

Resum

L'anàlisi de risc en el sector industrial químic, és una de les eines més útils que existeixen actualment, no obstant, hi ha fenòmens que encara no estan prou estudiats per a poder establir mesures prou precises, degut a la gran varietat d'escenaris en què ens podem trobar.

Aquest projecte està enfocat a millorar el coneixement sobre la naturalesa dels dolls de foc. Els dolls de foc són un tipus d'incendi que es produeix en fuites contínues de fluids inflamables que es desplacen a pressió per canonades o equips. Aquesta fuita, en les condicions adequades, originen una flama de difusió turbulenta que pot assolir dimensions considerables, i que desprèn radiació tèrmica.

Per a poder comprendre la naturalesa dels dolls de foc s'han estudiat anàlisis històriques dutes a terme per altres autors. La finalitat ha estat veure quins són els escenaris més propensos a la generació dels dolls de foc i denotar la importància dels dolls de foc com a desencadenants de l'efecte dominó.

Per altra banda, i essent l'objectiu principal del treball, s'ha estudiat l'efecte de la pressió atmosfèrica en la geometria dels dolls de foc. Primerament es demostrarà que la variació de la pressió atmosfèrica pot ser important en certes zones i que les aproximacions realitzades actualment no són adequades. Posteriorment es realitzarà l'anàlisi qualitativa, determinant l'efecte d'aquesta variació de pressió en els paràmetres geomètrics principals, desenvolupant diferents models per a poder predir la geometria de les flames.

Finalment es farà una comparació dels models més representatius, amb els models plantejats.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	2
1. GLOSSARI	4
2. INTRODUCCIÓ	8
2.1. Objectius del projecte.....	8
2.2. Abast del projecte	9
2.3. Conceptes bàsics: risc i perill.....	9
2.4. Accidents.....	11
2.5. Els accidents greus	12
3. ACCIDENTS AMB FOC	16
3.1. Tipus d'incendis	16
4. DOLLS DE FOC	18
4.1. Anàlisi històrica	20
4.2. Models proposats per diferents autors per a dols de foc.....	21
4.2.1. Model de l'API RP 521	23
4.2.2. Model de Hawthorne (simplificat).....	26
4.2.3. Model de Hustand i Sonju.....	26
4.2.4. Model de Chamberlain.....	27
5. INTERÈS DELS DOLLS DE FOC A BAIXES PRESSIONS	32
6. INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL	34
7. DADES EXPERIMENTALS	35
7.1. Dimensionament	35
7.1.1. Relació cm/píxels.....	35
7.1.2. Dimensionament del doll de foc.....	36
7.1.3. Exemple d'imatge dimensionada.....	38
8. MODELITZACIÓ	40
8.1. Geometria ideal d'un doll de foc	40
8.2. Model 1: Figura simple - cilindre	41
8.2.1. Tractament de dades per a obtenir els paràmetres del model	42
8.2.2. Model 1 i correlacions obtingudes segons P	54



8.2.3.	Correcció del model	56
8.2.4.	Model 1 corregit i consideracions en la seva aplicació	57
8.3.	Model 2: Figura geomètrica que comprèn cilindre i con	58
8.3.1.	Tractament de dades per a obtenir els paràmetres del model	59
8.3.2.	Model 2 correlacions obtingudes segons el valor de P_{atm}	65
8.4.	Model 3: Con	66
8.4.1.	Tractament de dades per a obtenir els paràmetres del model	68
8.4.2.	Paràmetres del model 3	71
8.5.	Tendència dels models en funció de P_{atm}	72
9.	COMPARACIÓ AMB MODELS PREVIS	78
9.1.1.	Comparació amb el model de Hawthorne (1949)	80
9.1.2.	Comparació amb el model de Hustand i Sonju (1984)	80
9.1.3.	Comparació amb el model de Chamberlain (1987)	81
9.1.4.	Comparació amb altres models	81
10.	ANÀLISI DE LA GEOMETRIA EN FUNCIÓ DE LES VARIABLES ____	84
11.	AVALUACIÓ ECONÒMICA	85
12.	CONCLUSIONS	86
	Agraïments	87
13.	BIBLIOGRAFIA	88
13.1.	Referències bibliogràfiques	88
13.2.	Material bibliogràfic complementari	89
ANNEX 1:	VALORS DELS ESCENARIS EXPERIMENTALS	90
ANNEX 2:	MOSTRA DEL VALOR DE LA PATM EN POLÍGONS DE CATALUNYA	91
ANNEX 3:	CÀLCULS DESENVOLUPATS	95
ANNEX 4:	PLANIFICACIÓ DEL TREBALL AMB GANTTPROJECT ____	100

1. Glossari

A: paràmetre model de Hustand i Sonju [-].

b: tant per cent de L respecte al punt inferior del doll de foc [-].

B: paràmetre model de Hustand i Sonju [-].

C_L: límit d'explosió inferior [-].

C_p: capacitat calorífica a pressió constant [kJ·/kmol·K].

C_{st-vol}: fracció volumètrica combustible-mescla en condicions estequiomètriques [-].

C_v: capacitat calorífica a volum constant [kJ·/kmol·K].

d: diàmetre cilindre model de Hustand i Sonju [m].

D: diàmetre cilindre model 1 [cm].

D_i: diàmetre variable del doll de foc en el dimensionament d'imatges [cm].

D_j: diàmetre variable del doll de foc en forma de con invertit, model de Hawthorne [m].

D_{or}: diàmetre de l'orifici de la fuga [m].

ds: diàmetre efectiu del doll de foc [m].

Fr: nombre adimensional de Froude [-].

g: acceleració de la gravetat [m/s²].

h: metres sobre el nivell del mar [m].

H: distància entre el punt de fuga del fuel i l'extrem superior del doll de foc/ distància d'abast [m].

L: longitud de la flama visible del doll de foc [m].

L4: longitud de càlcul del model 3 [cm].

L5: longitud de càlcul del model 3 [cm].



L_b : longitud doll del foc sota la influència del vent [m].

L_{b0} : longitud doll del foc sense influència del vent [m].

m : flux màssic doll de foc [kg/s].

m' : flux màssic aire [kg/s].

Ma : nombre adimensional de March [-].

M_a : massa molecular de l'aire [kg/kmol].

M_j : nombre de Mach, cas específic doll [-].

M_v : massa molecular del fuel [kg/kmol].

P_{atm} : pressió ambiental/atmosfèrica [atm].

P_{cont} : pressió del contenidor del combustible [Pa].

Q : potència de combustió del combustible [W].

Q' : cabal de combustible [kg/s].

R : constant dels gasos ideals [J/mol·K].

R' : paràmetre del model API RP 521 [-].

Re : nombre adimensional de Reynolds [-].

Ri_{Lb0} : nombre adimensional de Richardson [-].

R_w : fracció velocitat vent/velocitat doll del combustible [-].

S : distància d'elevació [m].

T_{ad} : temperatura de flama adiabàtica [K].

T_{cont} : temperatura del contenidor de combustible [K].

T_j : temperatura del gas en l'orifici de sortida del doll [K].

T_w : temperatura del vent [K].

T_{∞} : temperatura absoluta de l'aire [K].

u_{av} : velocitat mitjana en el doll del combustible [m/s].

u_j : velocitat del doll de fuel [m/s].

u_w : velocitat del vent [m/s].

u_{∞} : velocitat del vent, model API RP 521 [m/s].

W : diàmetre màxim del doll de foc en forma de con invertit, model de Hawthorne [m].

W_1 : diàmetre inferior del con truncat model de Chamberlain [m].

W_2 : diàmetre superior del con truncat model de Chamberlain [m].

x : distància axial entre el punt de fuga i el punt en es vol determinar D_j [m].

x_c : coordenada x centre flama model API RP 521 [m].

Y : paràmetre auxiliar model de Chamberlain [-].

y_c : coordenada y centre flama model API RP 521 [m].

α : angle entre l'eix de l'orifici i el eix del doll de foc [°].

α_{st} : fracció molar dels n° de mols fuel i la mescla en condicions estequiomètriques [-].

Θ_{jv} : angle que es dona entre el vector aire i el vector eix del forat del combustible [°].

γ : coeficient isentròpic [-].

ρ_{aire} : densitat aire [kg/m³].

ρ_j : densitat doll del combustible [kg/m³].

ΔH_c : Entalpia de combustió [kJ/kg].



LECTURA SIGLES

MARS: Major Accident Reporting System.

FACTS: Failure and Accidents Technical information Systems.

MHIDAS: Major Hazard Incident Data Service.

API RP: American Petroleum Institute Relieving Pressure.

BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion.

2. Introducció

2.1. Objectius del projecte

En la indústria química es treballa habitualment amb substàncies inflamables (en general hidrocarburs: petroli, derivats del petroli, gas natural, etc.) o tòxiques, que comporten un cert risc degut als possibles accidents greus que poden ocórrer relacionats amb ells: incendis, explosions i núvols tòxics.

Hi ha diferents tipus d'incendis: de basal, de flamarada, dolls de foc, boles de foc. D'entre ells, els que tenen un radi d'acció més reduït són els dolls de foc. L'esdeveniment aïllat d'un doll de foc no hauria d'implacar en principi un risc elevat, ateses les seves dimensions i, en conseqüència, la limitada intensitat de la radiació tèrmica emesa. Ara bé, la situació pot canviar molt en el cas que hi hagi contacte directe de les flames del doll amb algun dels equips de la planta. Quan això passa, el flux calorífic que rep la superfície afectada és extraordinàriament elevat, doncs la turbulència del doll arrossega gran quantitat d'aire cap al seu interior, millorant considerablement la combustió.

Això pot produir una cadena d'esdeveniments que poden provocar un risc elevat en el complex industrial (conegut com "efecte dominó"). Els dolls de foc tenen la capacitat de fer perdre propietats mecàniques a les estructures, fins al punt de fer-les cedir i provocar danys imprevisibles. Tot i això, els dolls de foc han estat molt menys estudiats si es compara amb altres tipus d'incendis.

El principal objectiu del projecte és, per tant, estudiar els dolls de foc i modelitzar-ne la geometria. Aquesta modelització ha de permetre disminuir el risc de forma preventiva i reduir la freqüència dels accidents greus en als complexes industrials.

Estudis previs s'han centrat en predir la geometria del doll de foc a partir del flux màssic, la temperatura adiabàtica de la flama, la temperatura inicial del gas, la fracció molar de combustible en barreja estequiomètrica, la potencia tèrmica alliberada, el diàmetre de fuita, etc. Aquest projecte està orientat a l'estudi i dimensionament del doll de foc, sense tenir en compte la calor despresa, analitzant el seu comportament en funció de la pressió atmosfèrica.

2.2. Abast del projecte

El projecte està centrat en determinar l'efecte de la pressió atmosfèrica en les dimensions i la geometria del doll de foc, plantejant diferents models simples unidimensionals i, raonant quin seria el més recomanable segons la pressió ambiental. L'estudi s'ha realitzat per al cas del gas natural (metà).

2.3. Conceptes bàsics: risc i perill

Generalment els conceptes de risc i perillositat són utilitzats indistintament l'un de l'altre però el seu significat es diferent. En la directiva de SEVESO - U.E 2012/18/UE [1]- es defineixen perill i risc com:

- a) **Perill:** capacitat intrínscica d'una substància perillosa o una situació física d'ocasionar danys a la salut humana o al medi ambient.
- b) **Risc:** probabilitat que es produeixi un efecte específic en un període de temps determinat o en circumstàncies determinades.

Perill fa referència a la identificació d'un possible accident, mentre que risc dóna una idea quantitativa de l'accident.

L'avaluació del riscs dels possibles perills és important tant en el camp de prevenció de riscos laborals, com en l'àrea de disseny de processos industrials. Les operacions diàries especials (activitats que s'allunyen de les feines en condicions normals) en la indústria requereixen de personal que avaluin els possibles perills inherents a qualsevol activitat. Aquest personal estableix les mesures preventives per a minimitzar el risc del perill associat a l'activitat a realitzar.

En l'àrea de l'enginyeria és habitual el disseny o la modificació d'instal·lacions, on a l'hora de projectar es tenen en consideració una sèrie de factors com la funcionalitat (paràmetres de disseny), la versatilitat, el risc, els costos econòmics, etc.

L'anàlisi de riscs és important en la fase de disseny ja que ens ajuda a millorar la instal·lació sempre tenint en consideració que la selecció del disseny resultarà d'un equilibri entre els diferents criteris esmentats en el paràgraf anterior.

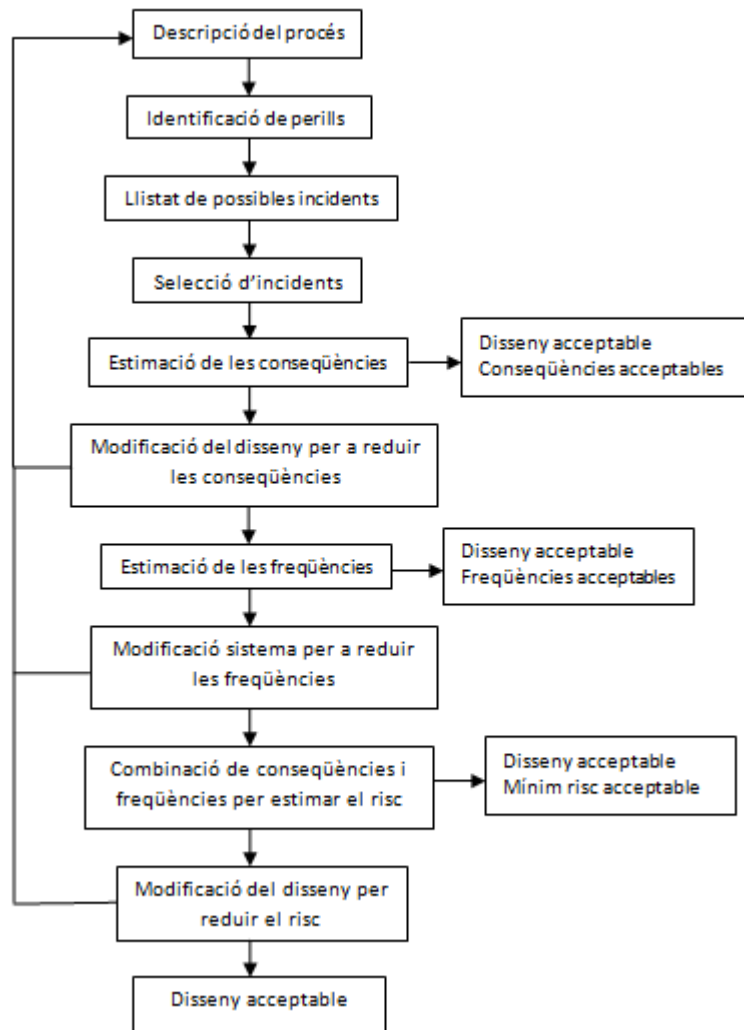


Figura 1: Esquema del procés d'anàlisi de riscos en el disseny de processos industrials.

En la Fig. 1 es mostra un esquema general del procés d'anàlisi de riscos en la fase de disseny d'una instal·lació [2]. En l'esquema es poden apreciar les següents fases:

1.- Identificació dels perills: a partir de la documentació i de les especificacions del disseny, obtenim una descripció del procés necessari per a realitzar un procés d'identificació de perills. L'eina que normalment s'utilitza per a la identificació de perills és el mètode HAZOP.

2.-Avaluació de les conseqüències: mitjançant models experimentals o teòrics .

3.-Estimació de la freqüència: es pot fer de dues maneres: mitjançant anàlisi històrica o amb eines d'estimació de freqüències com per exemple l'arbre de fallades. En molts casos s'avalua el risc combinant ambdues metodologies.

4.- Quantificació: es quantifica l'error amb l'expressió:

$$Risc\left(\frac{Conseqüències}{Temps}\right) = Freqüència\left(\frac{n^{\circ} d' events}{Temps}\right) \cdot Gravetat\left(\frac{Conseqüències}{Temps}\right) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

5.-Avaluació: Avaluació de si el risc és acceptable en el disseny o es modifica el disseny fins a assolir valors que es considerin acceptables.

L'anàlisi de riscos plantejat anteriorment, està orientat al disseny de processos, però aquesta eina es aplicable a altres camps: procediment/metodologies operacionals, procediments de manteniment, disseny d'equips, criticitat d'instruments, desenvolupament del procés de control, etc.

Tanmateix s'ha de tenir present que qualsevol activitat tindrà associats certs perills que mai es podran eliminar per complet, però per mitjà de l'anàlisi, es pot controlar el nivell de risc acceptable i mantenir-lo dins d'uns límits.

2.4. Accidents

En els inicis de l'indústria es va potenciar essencialment la producció a gran escala sense tenir en consideració les condicions de treball. La despreocupació per la seguretat en les instal·lacions industrials va produir accidents de greus magnituds. El terme accident fa referència a una combinació de les diverses situacions o circumstàncies que tenen com a resultat conseqüències indesitjades.

El sector químic sempre ha estat en el punt de mira, ja que les matèries primeres emprades en els processos sovint són potencialment peril·loso, i per tant les conseqüències poden ser majors en comparació als accidents que poden venir originats per altres activitats industrials.

En les dècades dels 70 i 80 hi va haver un seguit d'accidents (Seveso, Bhopal, Schweizerhalle, Enschede, etc) que van despertar la preocupació social. Com a resultat, la Comissió Europea i els governs van establir normatives dirigides a prevenir accidents i així limitar les conseqüències per a la salut humana i el medi ambient, en relació amb les activitats productives de les indústries que manipulessin substàncies peril·loso. Aquesta normativa es coneix com SEVESO I (82/501/EEC). Al llarg dels anys aquesta normativa s'ha anat modificant i s'han ampliat els sectors als quals afecta, fins a la data actual en que està vigent SEVESO III.

2.5. Els accidents greus

Quan parlem d'accidents en l'indústria química, es destaquen els accidents greus sobre els altres per les seves magnituds i l'impacte social que normalment se'ls hi associa.

Els accidents greus són aquells que s'originen a partir de processos industrials en què intervenen substàncies perilloses i que, degut a certes circumstàncies, originen incendis, emissions tòxiques o explosions, implicant un perill greu. Aquest perill pot ser immediat o diferit en la salut humana i/o el medi ambient.

Per poder fer-se una idea de la repercussió social i les conseqüències que poden causar els accidents greus, a la Taula 1 s'exposen alguns dels accidents greus més importants [6,5], que han contribuït a la modificació i millora de la directiva SEVESO. Els principals punts de SEVESO I estableixen realitzar un pla d'emergència intern, declarar substàncies catalogades com a perilloses, informar sobre les instal·lacions, identificar possibles riscos que derivessin de l'activitat industrial, formar i dotar al personal d'EPIs pertinents i l'obligació d'informar sobre els accidents greus en les instal·lacions.

SEVESO II va comportar modificacions en la classificació de les substàncies perilloses, l'obligació de l'empresari d'elaborar una política de prevenció d'accidents greus i implementar un sistema de gestió de seguretat, i de facilitar la informació sobre els riscos dels accidents greus, i l'obligatorietat per part de l'Administració de considerar la planificació urbanística i l'ordenació del territori segons el risc d'accidents majors. L'última actualització, dita SEVESO III, va ampliar el rang de sectors de la indústria als que afectava la normativa, va dotar de més eines d'informació als ciutadans sobre aquest tipus d'accidents i va ampliar el nombre de substàncies catalogades com a perilloses. [3]

Les conseqüències dels accidents poden variar segons la seva naturalesa. D'entre els accidents greus els incendis són accidents d'especial interès degut a que els danys personals, materials i ambientals que provoquen són destacables. Anàlisis històriques mostren que en una gran quantitat d'accidents el foc hi és present. Dabra i Casal [4] van realitzar un estudi on el 51% dels accidents corresponien a fuites de productes perillosos, 29% a focs, 17 % a explosions i 3% núvols de gas tòxic.

L'elevada freqüència d'aquests accidents, les seves conseqüències i el fet de ser un risc permanent per a la indústria, han fet que al llarg dels anys diferents investigadors hagin estudiat el seu comportament amb la finalitat d'evitar-los o mitigar les seves conseqüències.

Any	Localització	Descripció accident	Morts	Ferits
1974	Flixborough (Regne Unit)	Fuita en un reactor connectat en sèrie. En els dies previs a l'accident, de forma provisional es va <i>bypassar</i> mitjançant una canonada que no es va dimensionar correctament, per les pressions que havia de suportar, generant una fuita massiva de ciclohexà . La fuita va formar un núvol inflamable que immediatament va explotar.	28	36
1976	Seveso (Itàlia)	Accident causat pel trencament del disc de ruptura en un reactor produint-se la emissió de substàncies tòxiques , entre les que es trobava una dioxina molt tòxica (TCDD) . Les conseqüències van ser persones intoxicades i contaminació del medi ambient .	0	417
1978	Els Alfacs (Espanya)	Transport de propilè líquid mitjançant camió cisterna. Aquest camió no disposava de vàlvules de seguretat i es va sobrecarregar (24 tn quan el valor de disseny era de 19 tn). El dipòsit cisterna es va escalfar generant una sobrepressió que va donar en primer lloc un BLEVE i posteriorment una bola de foc.	216	200

1984	Cubatão (Brasil)	Fuita de petroli en un oleoducte situat a les proximitats d'una població de Cubatão. Van fuitar 700 tn de petroli en un embassament i posteriorment es va dispersar mitjançant corrents fluidals situats sota la població. La mescla es trobava en condicions d'inflamabilitat, que va resultar en incendis distribuïts en diferents punts de la població.	508	-
1984	San Juan de Ixhuatepec (Mèxic)	Accident en una instal·lació destinada a l'emmagatzematge i distribució de GLP. La capacitat nominal d'un dels dipòsits es va sobrepassar, i les línies d'alimentació i retorn operaven a pressions superiors a les de disseny. Com que les vàlvules de seguretat no van actuar, es va generar una fuita en una canonada. La fuita va resultar en núvol inflamable, desplaçant-se 100 m del punt de fuita, fins que va trobar un punt d'ignició generant una deflagració que va produir múltiples BLEVES de dipòsits en forma d'esfera que contenien gasos líquats.	500	2000

1984	Bhopal (Índia)	Fabrica de insecticides que utilitzava isocianat com a matèria prima. La sala de control va detectar la sobrepressió del dipòsit que contenia aquesta substància. Sabent que la vàlvula de seguretat alliberaria la substància, es van activar els scrubbers, però no la torxa, (problemes d'operabilitat / manteniment). El núvol que es va formar va desplaçar-se en direcció a Bhopal i els efectes van ser majors degut a que la fuita es va produir, en un dia en condicions d'inversió tèrmica, disminuint la dispersió.	2500-4000	50000
2001	Toulouse (França)	Les causes del accident no s'han concretat, però es sap que en el magatzem de matèries primes el nitrat d'amoni va generar l'explosió.	31	2500

Taula 1: Mostra accidents majors importants [5,6].

3. Accidents amb foc

És necessari conèixer la diferència entre foc, incendi i combustió, ja que sovint es fan servir indistintament:

- **Combustió:** reacció química en què un carburant reacciona amb un oxidant alliberant productes i energia (en forma de calor i llum).
- **Foc:** procés oxidatiu que es caracteritza principalment per produir-se desprendiment de calor i llum.
- **Incendi:** és l'accident produït pel risc del foc.

El foc és resultat de la reacció de combustió, per tant, és important conèixer la seva naturalesa. La reacció de combustió es produirà sota certes condicions, recollides en el que s'anomena tetraedre del foc. El tetraedre del foc exposa que, per a què es produeixi el foc es necessària l'existència de quatre factors: combustible, comburent, font d'ignició i que la reacció en cadena sigui favorable. Com a resultat de la reacció de combustió obtenim diversos productes i energia en forma de calor i llum.

L'existència d'aquests quatre factors no implica l'existència del foc, ja que s'han de donar certes condicions per a poder iniciar-se i proliferar.

3.1. Tipus d'incendis

Els focs que poden succeir en les instal·lacions industrials o en el transport de substàncies perilloses es poden classificar segons les condicions en què es dona la ignició i l'estat en que es troba el combustible. Els focs es poden donar en combustibles en estat sòlid, líquid o gas. En la indústria química normalment s'inicien per fuites, per tant, es donen principalment en líquids i gasos, ja que són estats amb capacitat de fluir, i de dispersar-se fàcilment. Un esquema general dels tipus de focs que s'originen per una fuga de combustible, és el que es pot observar en la Figura 2 [7].

- a) **Bola de foc i BLEVE:** són dos accidents diferents, però s'acostumen a produir junts. L'accident s'inicia amb una explosió física causada per la ruptura d'un dipòsit (BLEVE), que conté un líquid a una temperatura superior a la seva temperatura d'ebullició a pressió atmosfèrica (gas líquid). Aquest producte és alliberat de forma violenta, experimentant una vaporització instantània que provoca un flux elevat líquid/vapor. Si aquest massa bifàsica és inflamable i troba un punt d'ignició, llavors es genera una bola de foc.

b) Incendi de toll (pool fire): aquest fenomen es dona quan hi ha una fuga de combustible líquid que forma un toll. El combustible del toll s'evapora i si hi ha una font d'ignició s'origina un foc amb flames turbulentes perpendiculars al toll. Les flames s'alimenten del combustible vaporitzat, de manera que, en estat estacionari es genera un equilibri entre combustible evaporat i calor.

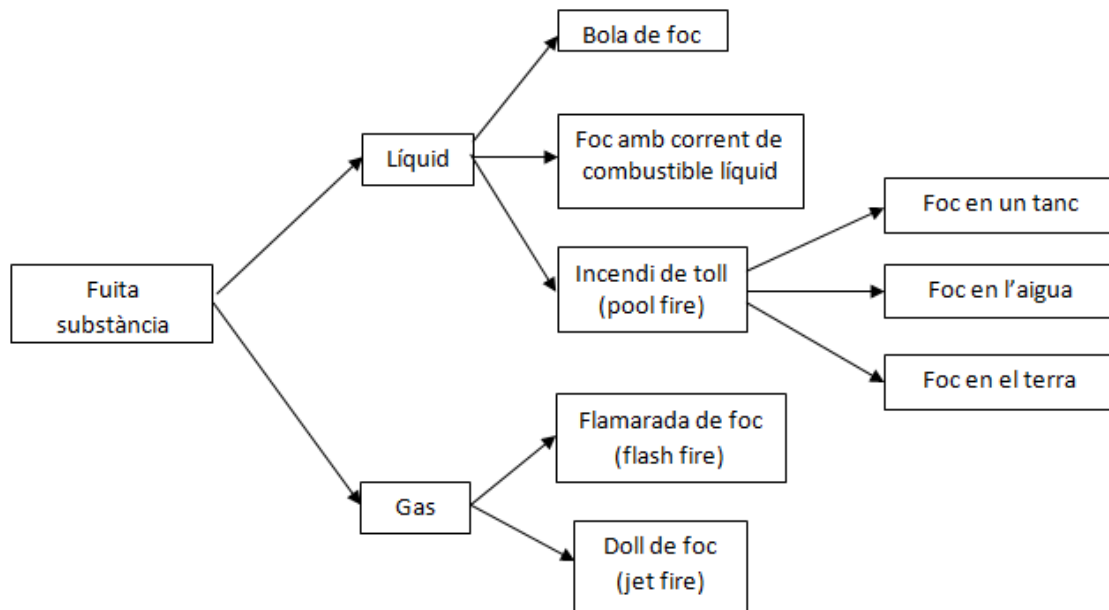


Figura 2: Esquema dels possibles incendis en les instal·lacions industrials originades per una fuga.

c) Flamarada (flash fire): es dona quan tenim una mescla combustible/aire en estat gasós, entre els seus límits d'inflamabilitat. Si aquesta mescla troba un punt d'ignició es genera una combustió molt ràpida, amb un front de flama que recorre el núvol segons la velocitat de combustió.

d) Dolls de foc (jet fire): flames de difusió turbulenta, que es generen per una fuga d'un combustible, normalment a velocitat elevada (en els casos de gas i vapor la pressió sol ser a la velocitat del so).

4. Dolls de foc

El doll de foc és la ignició d'una fuga contínua de gasos o de líquids inflamables, continguts en canonades o recipients amb sobrepressió que genera una flama de difusió turbulenta. Aquest foc es pot produir en condicions voluntàries, per exemple a les torxes, o en condicions involuntàries, com ara fissures, perforacions o evacuació de substàncies inflamables des d'una vàlvula de seguretat. Les fugites que es desenvolupen en condicions involuntàries són d'especial interès ja que són les que poden acabar en accident.

Degut a la naturalesa turbulenta de la flama la mescla combustible/aire rep fluxos d'aire que fan que la combustió es produeixi amb molta aportació d'oxigen. Això fa que la qualitat de la combustió sigui excepcionalment bona (les combustions accidentals, per exemple dels focs de toll, solen ser molt dolentes) i el potencial de calor alliberat sigui el màxim possible. La flama assolirà temperatures elevades que poden causar danys per radiació tèrmica o, amb molta més intensitat, per contacte directe amb una superfície.

Les dimensions del doll de foc solen ser reduïdes al comparar-les amb els diversos tipus d'incendis esmentats a l'apartat anterior (3.1.1). La concepció de risc d'un doll de foc com a esdeveniment aïllat no és d'especial interès, ja que els seus efectes són molt localitzats a una zona. Els dolls de foc cobren especial interès en el moment en què hi ha contacte amb altres sistemes de la instal·lació; en aquestes circumstàncies, el risc pot augmentar considerablement i la zona d'afectació pot ser molt extensa (efecte dominó).

L'efecte dominó s'ha d'entendre com una concatenació d'esdeveniments. Aquesta cadena d'esdeveniments implica que un accident genera unes circumstàncies que inicien un altra accident d'unes característiques diferents augmentant la zona d'afectació. Quan es donen aquestes escenaris parlem d'efecte dominó i les conseqüències són severes, amb radis d'afectació elevats i difícils de predir. En anàlisis històriques s'ha observat que en el 50% dels accidents relacionats amb els dolls de foc s'ha produït l'efecte dominó [8], per tant, el doll de foc és un perill que s'hauria de tenir en consideració tant com a agent iniciador del efecte dominó com a esdeveniment individual en l'anàlisi de riscos.

El comportament dels dolls de foc s'ha determinat experimentalment que està influenciat per diferents variables, però entre elles destaca la velocitat de fuga del fluid. En funció de la velocitat de fuga es pot establir si el doll és sònic o subsònic. Que un doll sigui sònic o subsònic afecta les dimensions que es poden donar, essent els dolls sònics generalment de majors dimensions que els subsònics.

Quan es produeix una fuga a pressió i succeeix el doll de foc, no arriba sempre a l'equilibri i en determinades circumstàncies pot autoextingir. En una fuga, durant el regim transitori

s'assoleix un equilibri entre la velocitat de combustió i la velocitat de fuga del doll, arribant a l'equilibri. Quan la velocitat de la flama es menor que la velocitat de fuga del doll, el front de la flama es desplaça cap a zones fora dels límits d'inflamabilitat i el foc s'autoextingeix.

A l'hora d'utilitzar models sobre els dolls de foc per a l'anàlisi de riscos, és important saber quines són les variables que afecten a la geometria del doll i quines d'elles han estat utilitzades per a generar el model. Segons els diferents models ja existents, la geometria del doll de foc depèn de:

- Condicions atmosfèriques (la direcció i el mòdul del vector vent).
- Estat del combustible: líquid, vapor o estat bifàsic líquid-vapor.
- El flux màssic (implicant altres paràmetres com diàmetre de l'orifici de fuga, velocitat del doll, densitat i viscositat del combustible, temperatura).
- Tipus de combustible.
- Presència d'obstacles.
- Orientació de la fuga.
- Pressió atmosfèrica.

4.1. Anàlisi històrica

A l'hora de realitzar anàlisis de risc, una de les pràctiques més utilitzades és l'anàlisi històrica d'accidents. Aquest procés té com objectiu recollir informació sobre com, i per què els accidents van passar. Si contestem aquestes preguntes tindrem coneixement de quines són les causes, les conseqüències i les freqüències del perill que s'han donat per a què es produís el sinistre. A partir d'aquí serà més factible quantificar el risc. La informació s'extreu de bases de dades com ara ARIA, MARS, FACTS, o MIDHAS.

Aquest apartat no pretén fer pròpiament una anàlisi de risc, sinó exposar quins són els escenaris més propensos a la formació d'un doll de foc en base a anàlisis realitzades prèviament per diferents autors.

Hi ha gran varietat de substàncies que han estat involucrades en accidents amb doll de foc, però les més destacades són el GLP amb un 61%, el H₂ amb un 12% i el gas natural amb un 10% (vegi's Taula 2). Cal remarcar que en aquesta taula els percentatges de les substàncies sumen més del 100%, ja que n'hi ha que han estat involucrades en més d'un accident.

Substància	Nombre d'accidents	%
GLP	51	61
Hidrogen	10	12
Productes químics	8	10
Gas Natural	8	10
Olis	7	8
Altres hidrocarburs	7	8
Etilè	6	7
Propilè	6	7
Metà	3	4
Nafta	3	4
Acetilè	2	2
Òxid d'etilè	2	2
Gasolina	2	2

Taula 2: Substàncies involucrades en accidents doll de foc [9].

L'anàlisi que van dur a terme M. Gómez- Mares i altres coautors [9] també aportava informació de l'espai en què es va produir el doll de foc; com que l'anàlisi històrica es va realitzar amb la base de dades MHIDAS es va mantenir la classificació en diverses categories d'aquesta base de dades. De les dades publicades podem veure com els accidents per doll de foc es produeixen generalment en el transport i en el procés productiu

(80%), amb una contribució menor però no negligible de les operacions de càrrega/descàrrega.

Origen general	Número d'accidents	%
Transport	37	44
Planta de Procés	30	36
Carga/descarrega	9	11
Emmagatzematge	8	10

Taula 3: Accidents relacionats amb dolls de foc.

Per tant, en projectes en els que estiguin involucrats GLP, hidrogen o gas natural s'haurà de posar especial atenció a la quantificació del risc per dolls de foc en les fases de transport i processament, així com en les esmentades operacions de transferència.

4.2. Models proposats per diferents autors per a dolls de foc

Es van començar a estudiar els dolls de foc modelant les flames de les torxes destinades a cremar els gasos de la indústria petroquímica. Posteriorment ja es van desenvolupar models per a analitzar accidents (dolls de foc). Les condicions dels dolls de foc i de les torxes són diferents, ja que en les torxes es generen dolls subsònics controlats, mentre que els dolls (accidentals) són quasi sempre sònics i, evidentment, incontrolats. Molts dels models destinats a predir la geometria de les torxes s'han adequat també per als dolls de foc. En la taula 4 es mostren alguns dels estudis més importants relatius als dolls i les torxes.

Estudis sobre torxes	Estudis sobre dolls de foc
API RP 521:1990	Hawthorne, Weddel i Hottel (1949)
Brzustowski i Sommer (1973)	Craven (1976)
Faveri et al (1985)	Sonju i Hustad (1984)
Chamberlain (1987)	Tam i Cowley (1989)
	D.A. Carter (1991)

Taula 4: Models més representatius dels dolls i torxes.

Hi ha diferents paràmetres d'ús genèric en gran part dels models que descriuen la fuga d'un gas/vapor a través d'un orifici. Les expressions corresponents són vàlides si la pressió del fluid varia significativament i el combustible es desplaça a altes velocitats. Al considerar un fluid en aquestes condicions s'ha de tenir present que la temperatura, densitat i pressió

variaren significativament a través de l'orifici [7]. És interessant considerar les següents expressions :

a) Diàmetre efectiu:

$$ds = D_{or} \cdot \left(\frac{\rho_j}{\rho_{aire}} \right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot m'}{\pi \cdot \rho_{aire} \cdot u_j}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

- m' = flux màssic del doll d'aire [kg/s].
- u_j = velocitat del doll [m/s].
- ρ_j = densitat del doll en expansió [kg/m³].
- ρ_{aire} = densitat del aire [kg/m³].
- D_{or} = diàmetre d'expansió [m].

El diàmetre efectiu fa referència al diàmetre imaginari d'una tovera que descarrega aire i combustible en les mateixes proporcions.

b) Densitat del gas en expansió:

$$\rho_j = \frac{P_{atm} \cdot M_v}{R \cdot T_i} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

- M_v = massa molar del gas [kg/kmol].
- P_{atm} = pressió ambiental [Pa].
- T_i = temperatura del gas en un cert punt [K].

c) Temperatura d'expansió:

$$T_j = T_{cont} \left(\frac{P_{atm}}{P_{cont}} \right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

- T_{cont} = temperatura del fuel en el contenidor [K].
- γ = coeficient isentròpic del gas [-].
- P_{cont} = pressió del combustible en el contenidor [Pa].

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

d) Pressió a l'orifici:

$$P_{or} = P_{cont} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

- P_{cont} = pressió del combustible (gas) en el contenidor [Pa].

A continuació s'exposen els models més utilitzats actualment.

4.2.1. Model de l'API RP 521

Aquest model està basat en diferents experiments desenvolupats per la indústria petroquímica americana.

$$L = 2,76 \cdot Q^{0,452} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$Q = m \cdot \Delta H_c \quad (\text{Eq. 4.7})$$

- L = longitud del doll [m].
- m = flux màssic [kg/s].
- ΔH_c = entalpia de combustió combustible [kJ/kg].
- Q = flux màssic [W].

Els valors que s'obtenen de l'equació 4.6 també es poden obtenir gràficament (veure Figura 3).

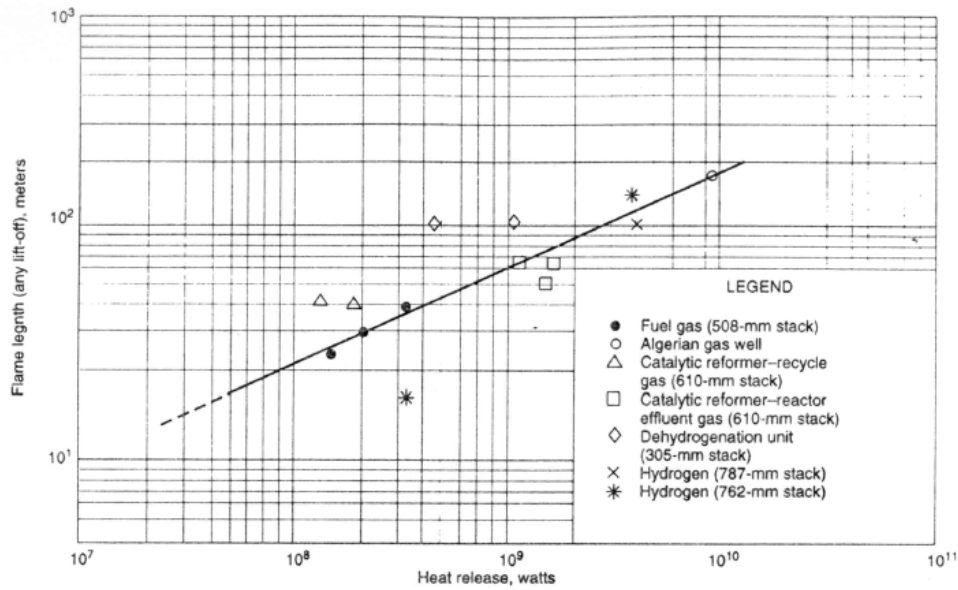


Figura 3: Model API RP 251 gràfica L [10,11].

Aquest model es vàlid quan Q està entre 30MW -10⁴MW i m entre 1-250 kg/s.

El model inclou una segona part desenvolupada per Brzustowski i Sommer en la que es determina el centre de la flama. Es calculen els paràmetres :

$$\overline{C_L} = C_L \frac{u_j}{u_\infty} \frac{M_v}{29} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$R' = \frac{u_j}{u_\infty} \left(\frac{T_\infty \cdot M_v}{T_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

- $C_L / \overline{C_L}$ = límit d'explosivitat o inflamabilitat inferior/límit d'explosivitat o inflamabilitat inferior modificat [fracció molar].
- R = paràmetre del model [-].
- u_∞ = velocitat del vent [m/s].
- T_∞ = temperatura absoluta del aire [K].

Les coordenades x_c i y_c s'obtenen gràficament de les següents figures:

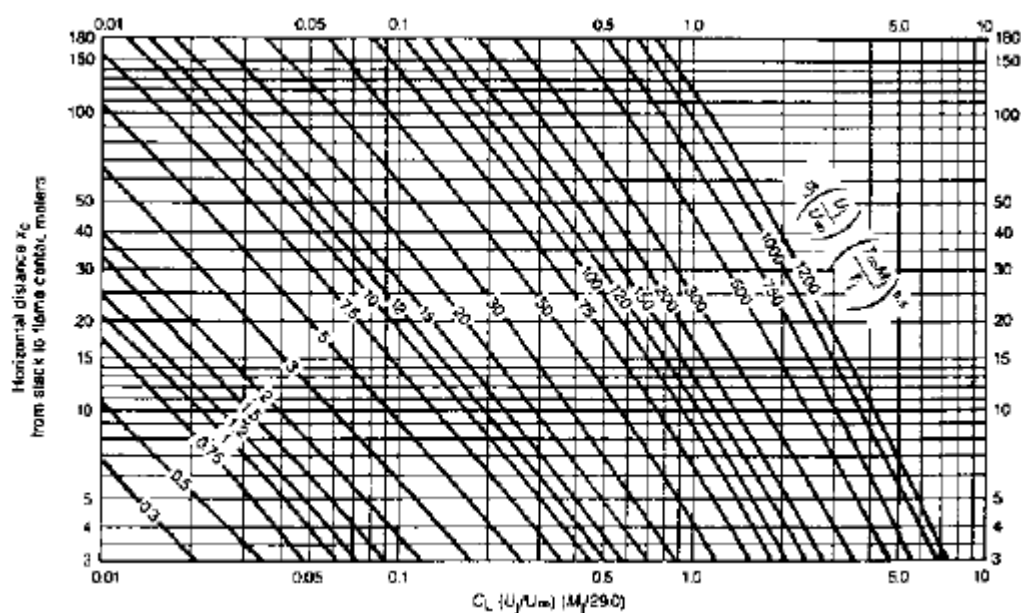


Figura 4: Determinació de la coordenada del centre x_c [10].

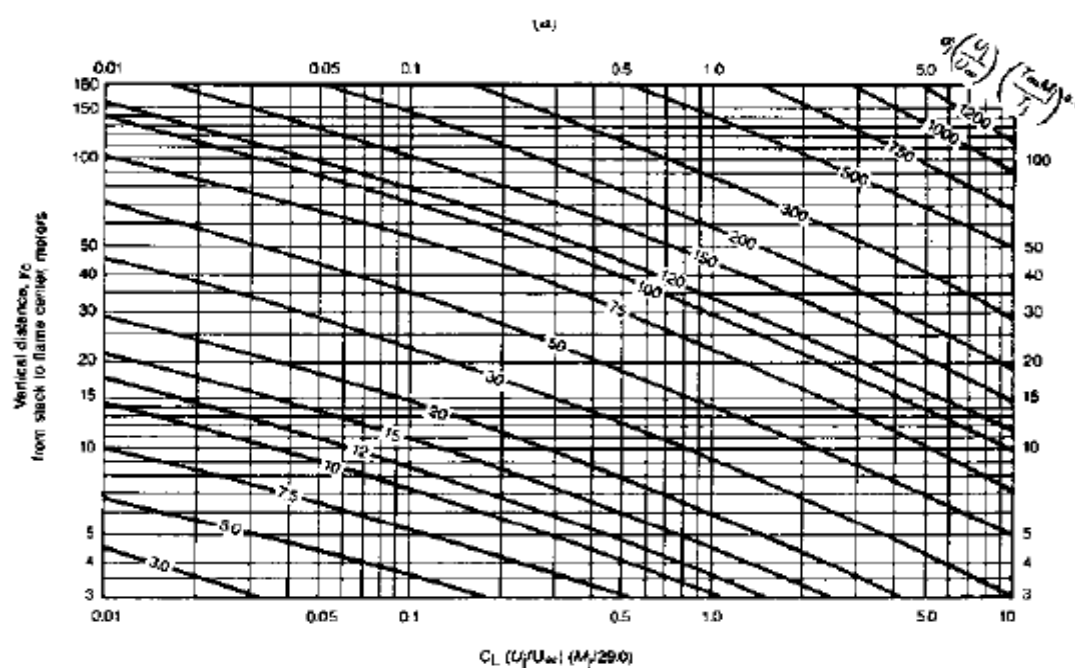


Figura 5: Determinació de la coordenada del centre y_c [10].

4.2.2. Model de Hawthorne (simplificat)

Aquest és un dels primers models que es van desenvolupar per a estimar la geometria dels dols de foc; es caracteritza per suposar la forma de con invertit.

$$L = D_{or} \frac{15}{c_{st-vol}} \left(\frac{M_a}{M_v} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

$$S = \frac{6,4\pi \cdot D_{or} \cdot u_j}{4u_{av}} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

$$D_j = 0,29 \cdot x \cdot \left[\ln \frac{L}{x} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

- c_{st-vol} = fracció volumètrica fuel-mescla en condicions estequiomètriques [-].
- u_{av} = velocitat mitja doll combustible [m/s].
- S = distància d'elevació [m].
- x = distància axial entre el punt de fuga i el punt on es vol determinar D_j [m].

4.2.3. Model de Hustand i Sonju

Aquest model determina la geometria del doll de foc a partir del n° de Froude:

$$\frac{H}{D_{or}} = A \cdot Fr^m \quad (\text{Eq. 4.13})$$

$$\frac{d}{D_{or}} = B \cdot Fr^m \quad (\text{Eq. 4.14})$$

On el n° de Froude el calcularem com:

$$Fr = \frac{u_j^2}{g \cdot D_{or}} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

- D = diàmetre de la flama [m].
- g = acceleració de la gravetat [m/s^2].
- u_j = velocitat de sortida del gas [m/s].
- D_{or} = diàmetre de l'orifici [m].

Els valors d'A, B i m són valors que s'obtenen experimentalment per a cada combustible. Els autors d'aquest model van realitzar assajos amb metà i propà, generant un doll de foc vertical. Pel metà es va obtenir que $A = 21$, $B = 2,5$ i el valor de m depenia del valor del n^o de Froude; si $Fr < 10^5$ $m = 0,2$ i si $Fr > 10^5$ $m = 0$.

4.2.4. Model de Chamberlain

Nombrosos models de dolls de foc han estat desenvolupats per la petrolera SHELL en el centre de recerca Shell Thornton, com ara el model plantejat per Chamberlain, el model de Cook, el model de Johnson, etc. Aquest centre d'investigació va desenvolupar el model de Chamberlain, un dels més acceptats per la comunitat científica i més implementat en programes de simulació.

El model de Chamberlain es va dissenyar per a determinar la geometria i el flux de calor dels dolls de foc amb orientació horitzontal, vertical o inclinada i en estat gas o bifàsic (gas/líquid). El model té en consideració:

- La P_{cont} i T_{cont} del gas en els dipòsits.
- L'orientació i sentit del vent.
- L'angle entre el eix del doll i el vent.

Es comença calculant el paràmetre Y de forma iterativa:

$$0,024 \left(\frac{g \cdot d_s}{u_j^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Y^{\frac{5}{3}} + 0,2 \cdot Y^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{2,85}{c} \right)^{\frac{2}{3}} = 0 \quad (\text{Eq. 4.16})$$

- c = fracció massica en condicions estequiomètriques [-].

Si ens trobem en el cas que no hi ha vent L_b es calcula com:

$$L_{b0} = Y \cdot ds \quad (\text{Eq. 4.17})$$

Si tenim vent, L_b la calculem com:

$$L_b = L_{b0} (0,51 \cdot e^{-0,4uw} + 0,49) (1 - 6,07 \cdot 10^{-3} (\theta_{jv} - 90)) \quad (\text{Eq. 4.18})$$

- θ_{jv} = angle entre la generatriu del forat d'expulsió del gas i el vector del vent.

$$S = L_b \cdot \frac{\sin((0,185 \cdot e^{(-20Rw)} + 0,015) \cdot \alpha)}{\sin \alpha} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

$$Rw = \frac{u_w}{u_j} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

La distància d'elevació amb absència de vent es calcula:

$$s = 0,2 \cdot L_b \quad (\text{Eq. 4.21})$$

La longitud del tronc s'obté de:

$$L = \sqrt{L_b^2 - s^2 \cdot \sin^2 \alpha} - s \cdot \cos \alpha \quad (\text{Eq. 4.22})$$

on α es determina mitjançant equacions diferents segons el valor de Rw :

a) Si $R_w \leq 0,05$:

$$\alpha = (\theta_{jv} - 90) \cdot (1 - e^{-25,6 \cdot R_w}) + 8000 \cdot \frac{R_w}{Ri_{L_{bo}}} \quad (\text{Eq. 4.23})$$

b) Si $R_w > 0,05$:

$$\alpha = (\theta_{jv} - 90) \cdot (1 - e^{-25,6 \cdot R_w}) + \frac{(134 + 1726(R_w - 0,026)^{\frac{1}{2}})}{Ri_{L_{bo}}} \quad (\text{Eq. 4.24})$$

On els paràmetres $Ri_{L_{bo}}$, θ_{jv} s'obtenen de:

$$Ri_{L_{bo}} = L_{bo} \left(\frac{g}{d_s^2 \cdot u_j^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 4.25})$$

$$\cos \theta_{jv} = \cos \Omega \cos \theta_j \quad (\text{Eq. 4.26})$$

- Ω = angle entre el vector direcció vent i la normal perpendicular al pla horitzontal al ejector.
- θ_j = angle entre la generatriu del ejector i la horitzontal del pla vertical.

Les amplades superior W_2 i inferior W_1 venen determinades per:

$$W_1 = d_s \cdot (13,5 \cdot e^{-6 \cdot R_w} + 1,5) \cdot \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\rho_{aire}}{\rho_j} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{15} \right] e^{-70 R_{ids} C' R_w} \right] \quad (\text{Eq. 4.27})$$

$$W_2 = L_b (0,18e^{-1,5Rw} + 0,31)(1 - 0,47e^{-25Rw}) \quad (\text{Eq. 4.28})$$

Per a obtenir els valor de W_1 i W_2 s'han de calcular prèviament el nº de Richardson i el paràmetre C :

$$C = 1000 \cdot e^{-100Rw} + 0,8 \quad (\text{Eq. 4.29})$$

$$Ri_{ds} = d_s \left(\frac{g}{d_s^2 \cdot u_j^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 4.30})$$

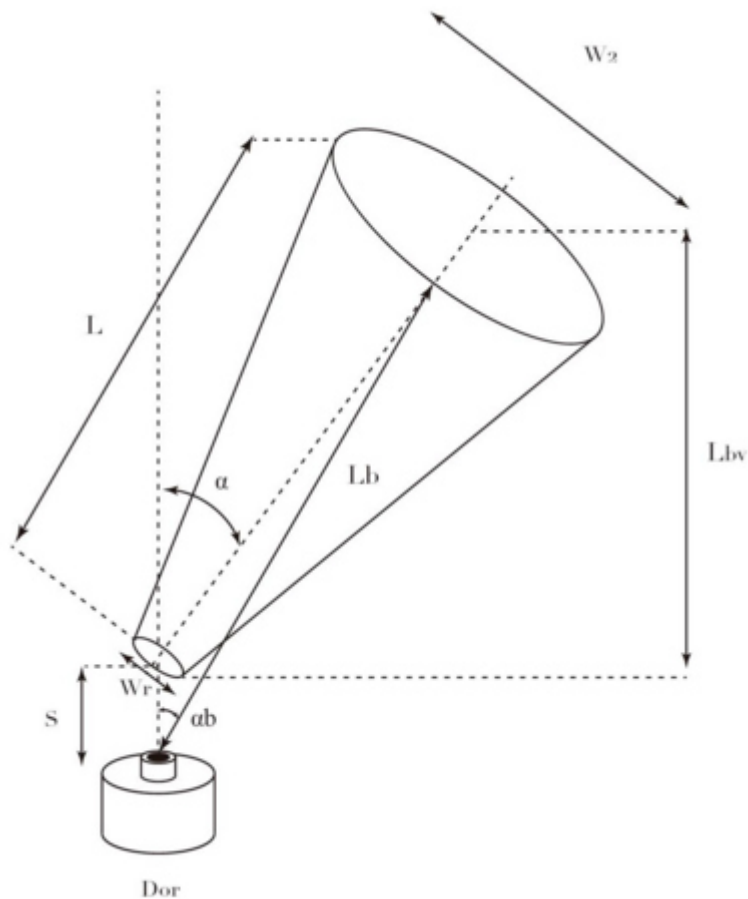


Figura 6: Esquema gràfic model de Chamberlain.

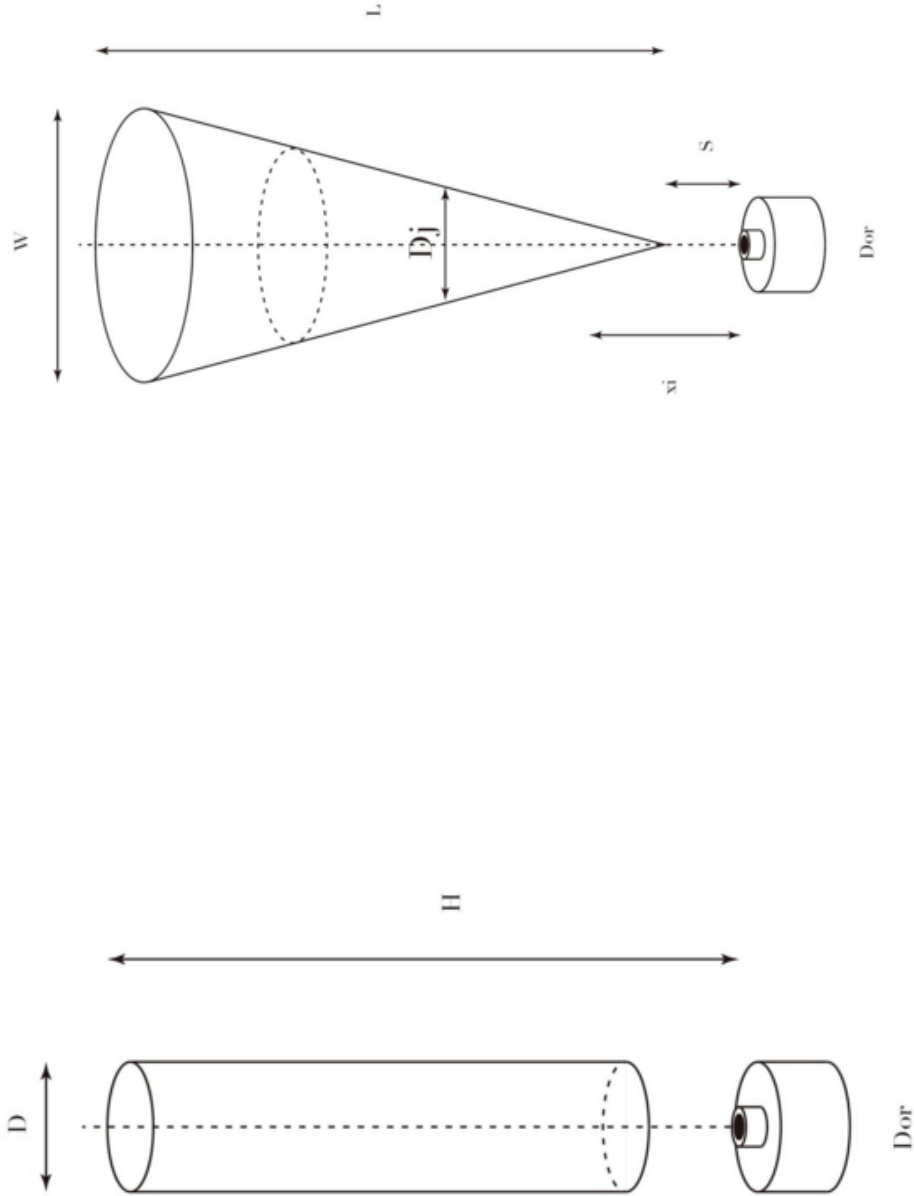


Figura 7: Esquema gràfic model de Hustand and Sonju.

Figura 8: Esquema gràfic model de Hawthorne.

5. Interès dels dolls de foc a baixes pressions

Generalment quan es planteja qualsevol projecte o problema en que és necessari el valor de la pressió atmosfèrica, s'aproxima aquest valor a 1 atm. Aquesta aproximació no sempre es vàlida, ja que depenent de la localització geogràfica, l'error que es pot cometre pot ser significatiu.

La pressió atmosfèrica en qualsevol punt de la superfície terrestre depèn de la columna d'aire que es té per sobre i es pot calcular com:

$$P_{atm} = \rho_{aire} \cdot g \cdot h \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Aquesta pressió no és constant ja que la densitat de l'aire varia en funció de la temperatura i de la humitat, factors que oscil·len al llarg del temps. Negligint aquestes oscil·lacions de la densitat s'obté un valor realista de la pressió que, evidentment, depèn de l'alçada a la que es mesuri.

L'objectiu del projecte és determinar l'efecte de la pressió atmosfèrica en la geometria del doll de foc. El fet de que normalment s'estimi la pressió atmosfèrica a 1 atm fa necessari mostrar que l'efecte de l'alçada sobre la pressió pot ser considerable i no negligible. Per tal de mostrar l'efecte del canvi de pressió atmosfèrica s'ha agafat una mostra de polígons industrials de Catalunya i s'ha establert la pressió atmosfèrica a partir de la seva cota respecte el nivell del mar (msnm).

Polígon industrial	Municipi	Província	h [msnm]	P _{atm} [atm]
Cim de la Selva	Vilarobí d'Onyar	Girona	148	0,982
El Verdguer	Manlleu	Barcelona	461	0,946
El Pla de Codina	Bellver de Cerdanya	Lleida	1061	0,88
Puigdorca	Balsareny	Barcelona	327	0,961
Els Salacons	Sort	Lleida	692	0,92
Montferrer i Castellbó	Montferrer i Castellbó	Lleida	732	0,916
Els Cossos	Fortià	Girona	8	0,999
Homs	Alcarràs	Lleida	137	0,983
Baix Ebre	Tortosa	Tarragona	14	0,998
La Plana	Gandesa	Tarragona	368	0,957

Taula 5: Mostra de les pressions atmosfèriques en polígons industrials a Catalunya.

El fet d'agafar com a punts geogràfics polígons industrials, és degut a què es consideren àrees potencials respecte l'existència del doll de foc.

Els valors de la pressió atmosfèrica s'han obtingut mitjançant un programa de càlcul que es troba en xarxa, anomenat 1976 Standard Atmosphere Calculator [12].

Si observem els valors obtinguts, es pot comprovar que hi ha polígons industrials en els que l'aproximació del valor a 1 atm és correcte en casos com Cim de la Selva, els Cossos o La Plana. Però en altres polígons com ara Montferrer i Castellbó, els Salacons o El Pla de Codina els valors de la pressió s'allunyen bastant de l'aproximació i per tant al utilitzar-la estaríem cometent un cert error, si els valors del model es veuen influenciats en gran magnitud per aquesta variable. En l'Annex 2 hi ha el llistat d'on s'han extret els valors de la Taula 5.

En el cas de Catalunya la disminució de la pressió és relativament baixa, ja que com a màxim em trobat polígons sotmesos a 0,88 atm. Aquestes variacions de pressions poden ser majors en altres zones on el relleu geogràfic sigui més abrupte. En la Taula 6 es poden veure les cotes d'altura mitjana de diferents països. En aquesta taula es pot observar el fet de què la pressió atmosfèrica en certs països del món no es pot aproximar a 1 atm.

País	mitja msnm[m]	P_{atm} (atm)
Australia	330	0,961
Andorra	1996	0,78
Xile	1871	0,797
China	1840	0,8
Egipte	321	0,962
França	375	0,956
Alemanya	263	0,969
Jamaica	18	0,997
kyrgyzstan	2988	0,6929
Espanya	660	0,92

Taula 6: Pressió atmosfèrica països segons cota d'alçada mitjana [13].

6. Instal·lació experimental

P&ID INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL

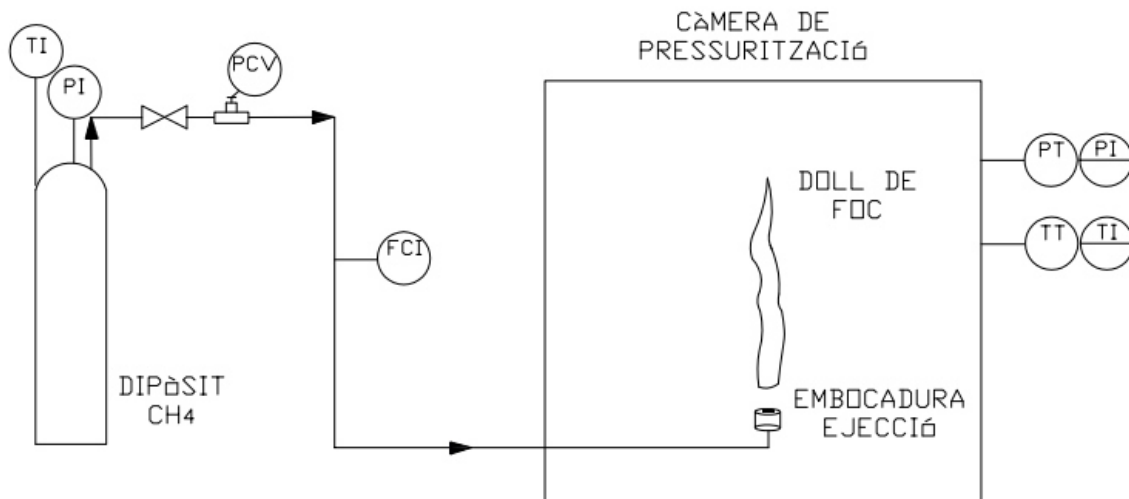


Figura 9: P&ID de la instal·lació experimental.

La Figura 8 mostra de forma simplificada la instal·lació que es va utilitzar per a obtenir les imatges utilitzades per a desenvolupar els models. Es disposava d'un dipòsit amb termòmetre i manòmetre, on es feia la lectura de T_{cont} . El flux de metà s'iniciava en obrir una vàlvula de pas i mitjançant un manoreductor s'adaptava P_{cont} . El cabal Q' és determinava mitjançant un caudalímetre que donava la lectura. Passat el caudalímetre, el metà era dirigit a un ejector situat a l'interior d'una càmera pressuritzada, on es podia variar la pressió ambiental, P_{atm} i les embocadures d'ejecció D_{or} . La càmera pressuritzada, disposava de dos transmissors, un de temperatura i un de pressió, que donaven lectura en un monitor de P_{atm} i T_{amb} . Com a font d'ignició s'utilitzava un braç amb una resistència elèctrica, que iniciava el doll del foc.

La realització dels experiments i el muntatge experimental s'han portat a terme de manera conjunta per la Fundación Universidad de las Americas (Puebla, Mèxic), University of Leeds (GB) i University of Science and Technology of China. El tractament de dades realitzat en aquest treball s'ha fet sobre una mostra de dades facilitada per aquests investigadors (veure Annex 1).

7. Dades experimentals

7.1. Dimensionament

En aquest apartat s'exposa com es van obtenir les dimensions del doll de foc a partir de les imatges capturades durant els experiments.

7.1.1. Relació cm/píxels

Una foto la podem definir com una matriu de píxels, amb les seves corresponents files i columnes. Cada píxel de la imatge, queda definit segons el nº de fila i de columna. Per tal d'establir una relació entre els píxels i les dimensions en x i y s'utilitza una imatge de referència, on coneixem les dimensions entre els dos punts (veure Figura 10).



Figura 10: Imatge de referència.

Com que la qualitat de la imatge no és gaire bona i es considera que hi ha un cert grau d'inclinació que pot afectar el valor obtingut, es realitzaran 6 mesures en diferents zones de la imatge.

Mostra	Coordenades				dy [cm]
1	351	1034	351	989	45
2	353	975	353	931	44
3	353	901	353	857	44
4	354	843	354	797	46
5	356	703	356	656	47
6	358	579	358	532	47
					45,5
					0,10989

Taula 7: càlcul de la relació y-píxel

Mostra	Coordenades				dx [cm]
1	337	533	369	533	32
2	338	586	370	586	32
3	337	693	369	693	32
4	335	904	367	903	32
5	348	522	381	522	33
6	349	573	381	573	32
					32,17
					0,10569

Taula 8: càlcul de la relació x-píxel

Per tant, de la imatge de referència obtenim en la direcció x 0,1057cm/píxel i en la direcció y 0,1099 cm/píxel.

7.1.2. Dimensionament del doll de foc

Del procés experimental es van obtenir un total de 875 imatges corresponents als diferents escenaris. En cada escenari es van mantenir els paràmetres de diàmetre del orifici i la velocitat del doll, així com l'orientació i l'absència d'alteracions causades pel vent. Els paràmetres variables van ser la pressió i la temperatura ambiental, essent la pressió la variable essencial per a determinar la geometria del model.

Per a cada conjunt d'imatges amb diferent valor de pressió ambiental es van seleccionar un total de 20 imatges en estat estacionari. Per això es va treballar en el rang d'imatges [150;875], eliminant la fase inicial fins a la ignició i l'arribada a l'estat estacionari. Es va realitzar el següent procediment:

- 1.- Selecció arbitrària de les imatges i conversió a paint.

- 2.- Inversió dels colors, per a poder diferenciar amb precisió el contorn del doll de foc.
- 3.- Determinació de les coordenades dels punts a , b , c_i , d_i i i . Els punts c_i i d_i prenen valors a un 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 per cent de L (mantenint constant la coordenada y) respecte a la part inferior, per tal de veure l'evolució del diàmetre al llarg de l'eix y .
- 4.- A partir de les coordenades es passen els píxels a longituds reals.

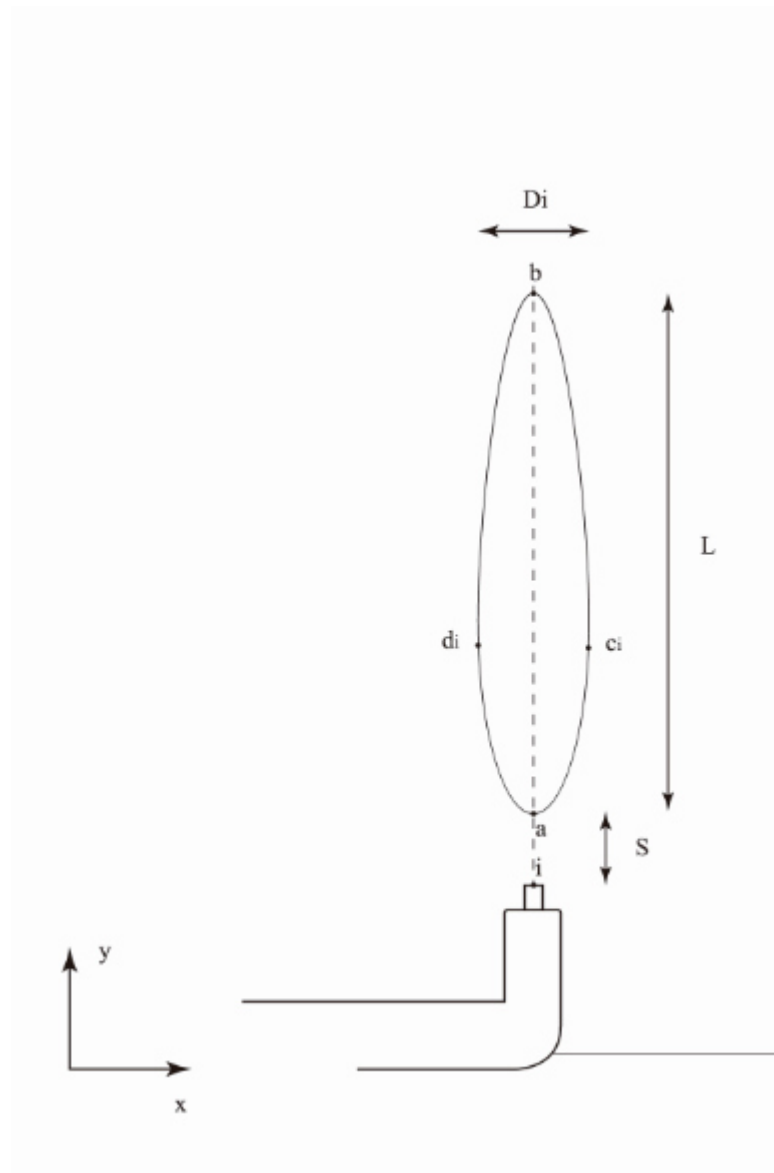


Figura 11: Esquema del mètode de dimensionament del doll de foc.

7.1.3. Exemple d'imatge dimensionada

Agafem la imatge 470 de P_{atm} 0,9 atm i realitzem la inversió de colors amb paint.

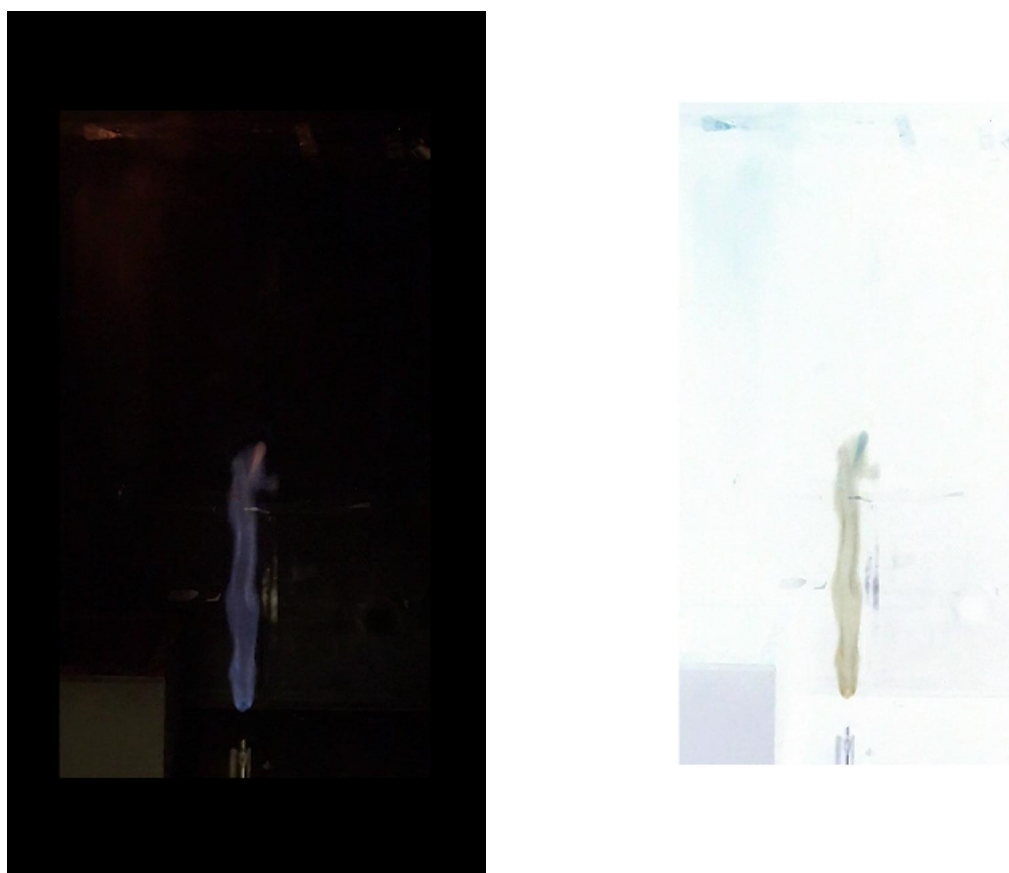


Figura 12: Inversió de colors de la imatge 470.

En la imatge de color invertit el contorn del doll de foc queda ben definit i obtenim les coordenades dels punts a, b, c_i, d_i i i. Primer es calcula L, determinant les coordenades dels punts a i b mitjançant el punter.

nº imatge	punt a		punt b		dy [pixels]	L [cm]
	ax	ay	bx	by		
470	347	1035	347	634	401	42,60625

Taula 9: Obtenció del valor de L per a la imatge 470 $P_{atm} = 0,9$ atm.

A partir de les coordenades del punt a (347,1035), calculem les coordenades dels diferents punts c_i, d_i on i és el 10, 20...90% de L. Per a fer-ho tenim en compte el valor de L en píxels i anem obtenint les coordenades per a què posteriorment podem trobar la coordenada corresponent.

Hem de considerar que pel fet de treballar amb píxels, especificar-los amb números decimals no és adequat; per això s'arrodoneixen els valors. El paràmetre b fa referència al tant per 1 respecte de L .

$$D = \text{arrodonir}(ay - b \cdot dy) \quad (\text{Eq. 7.1})$$

Per exemple per a trobar D_{10} realitzaríem el següent càlcul:

$$D_{10y} = \text{arrodoniment} (1035 - 0,1 \cdot 401) = 995$$

Amb aquest valor hem de buscar els punts del contorn de la flama ($x_1, 995$), ($x_2, 995$); mitjançant el punter trobem que $x_1 = 377$ i $x_2 = 339$. Aquest procediment el repetim per tots els %L i obtenim la Taula 10:

Imatge 470	punt c		punt d		dx [píxels]	D [cm]
	cx	cy	dx	dy		
D10	377	995	339	995	38	4,2601
D20	375	955	341	955	34	3,8117
D30	380	915	338	915	42	4,7085
D40	384	875	329	875	55	6,1659
D50	378	835	338	835	40	4,4843
D60	380	794	344	794	36	4,0359
D70	381	754	339	754	42	4,7085
D80	377	714	335	714	42	4,7085
D90	393	674	338	674	55	6,1659

Taula 10: Obtenció dels diàmetres per a la imatge 470 $P_{atm} = 0,9 \text{ atm}$.

Finalment, anem a determinar S localitzant directament el punt i i tornant a localitzar el punt a de forma que es seleccioni el punt més pròxim (punt crític).

nº imatge	punt a		punt i		dy [píxels]	S [cm]
	ax	ay	ix	iy		
470	350	1073	350	1023	50	5,3125

Taula 11: Obtenció de S per a la imatge 470 $P_{atm} = 0,9 \text{ atm}$.

8. Modelització

8.1. Geometria ideal d'un doll de foc

La figura adjunta mostra una sèrie d'imatges d'un dels experiments, ordenades seqüencialment.

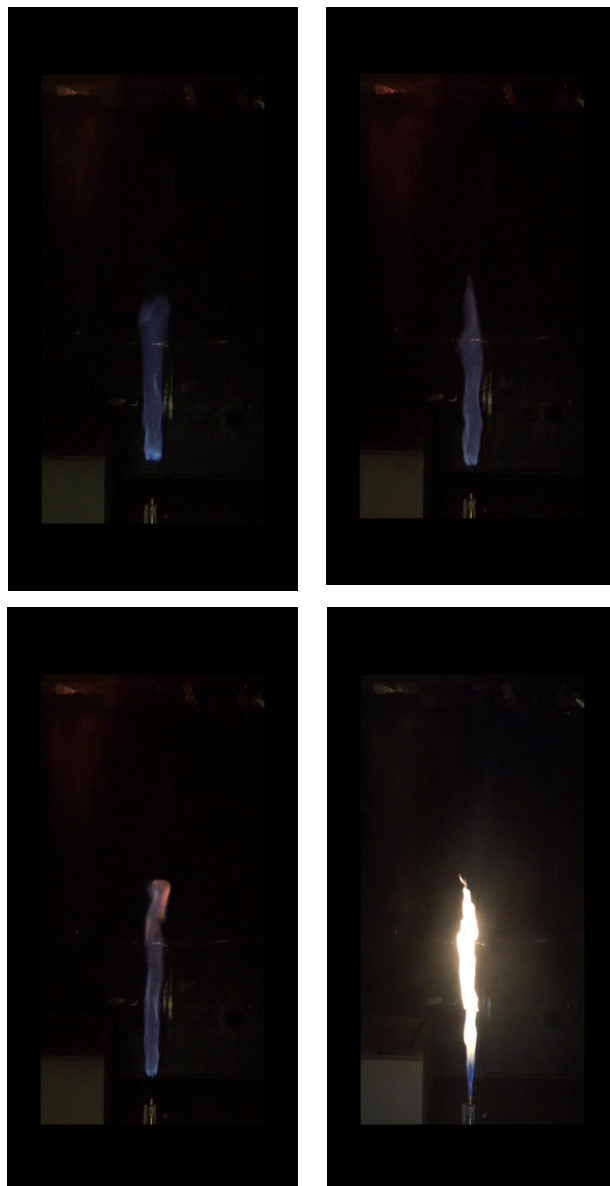


Figura 13: Imatge 167 $P_{atm} = 0,64atm$, Imatge 206 $P_{atm} = 0,8atm$, Imatge 266 $P_{atm} = 0,9atm$, imatge 175 $P_{atm} = 1atm$ ordenades seqüencialment.

Si observem les imatges seleccionades de les mostres obtingudes durant l'experiment, podem veure dues geometries ideals. Per una banda tenim que les imatges 167 ($P_{atm} = 0,64 \text{ atm}$) i 266 ($P_{atm} = 0,9 \text{ atm}$) es poden assimilar a un cilindre. Per altra banda les imatges 206 ($P_{atm} = 0,8 \text{ atm}$) i 175 ($P_{atm} = 1 \text{ atm}$) s'aproximen a un cilindre, però també amb la composició de dues formes geomètriques ideals: cilindre i con. Apart d'aquests dos models, es plantejarà un model específic per a l'escenari $P_{atm} = 1 \text{ atm}$, on el doll es modelitza com un con invertit.

8.2. Model 1: Figura simple - cilindre

Al considerar la flama com un cilindre, si prenem com a punt de referència el punt que resulta de la intersecció de la generatriu de l'ejector i la superfície superior del mateix, especificarem la geometria del doll de foc a partir dels següents paràmetres:

- 1.- Distància d'elevació, $[S]$ = distància entre el punt de referència i el punt inferior del doll de foc, punt a.
- 2.- Longitud del doll de foc, $[L]$ = distància entre els dos punts extrems del doll, distància entre els punts a i b.
- 3.- Diàmetre equivalent, $[D]$ = diàmetre constant al llarg de L , distància entre els punts c i d.

Amb el punt de referència i els paràmetres anteriors, el model queda totalment definit (veure Figura 14).

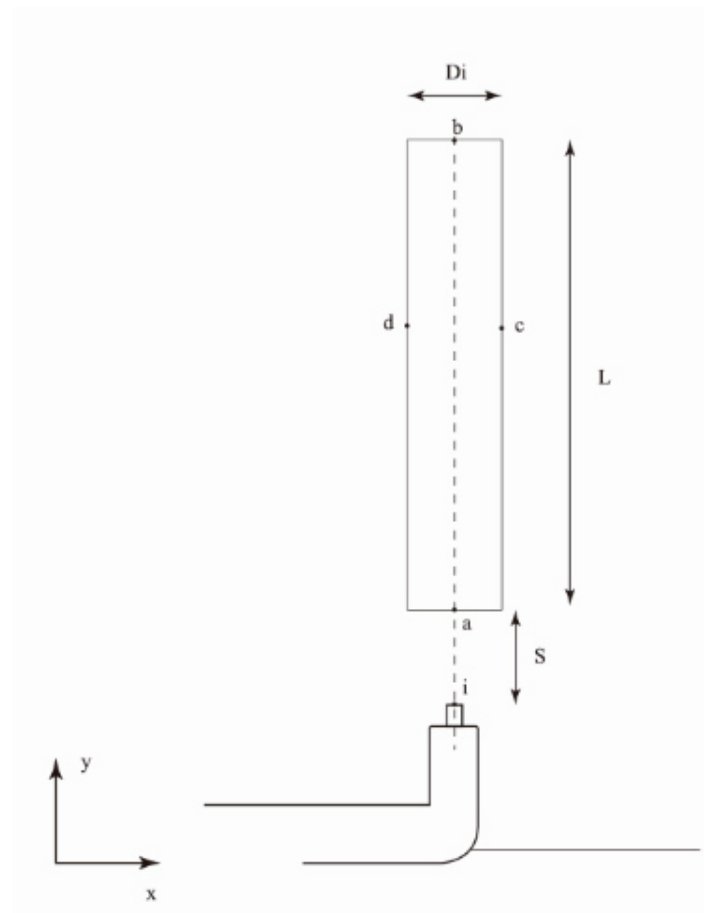


Figura 14: Esquema del model 1.

8.2.1. Tractament de dades per a obtenir els paràmetres del model

Per a obtenir el paràmetre D , es realitza la mitjana aritmètica del conjunt de valors D_i , ja que un total de 20 imatges (9 D_i per imatge), es considera una mostra de població suficientment gran per a aproximar-se al valor real.

Pel que fa als paràmetres L i S , amb el procés utilitzat només es disposa de 20 valors i es considera que no són suficients, de forma que cal ampliar la mostra. En les següents taules, es determinen únicament els paràmetres esmentats.

nº imatge	L [cm]	D10 [cm]	D20 [cm]	D30 [cm]	D40 [cm]	D50 [cm]	D60 [cm]	D70 [cm]	D80 [cm]	D90 [cm]	D [cm]	S [cm]
150	34,7438	4,5688	4,4625	4,2500	4,9938	4,7813	5,7375	4,9938	6,2688	4,6750	4,9701	7,5438
190	43,6688	5,2691	5,8296	5,1570	4,1480	5,2691	3,5874	3,8117	4,3722	5,3812	4,7583	7,9688
232	38,6750	4,7085	4,8206	5,8296	4,5964	5,4933	5,8296	7,2870	4,4843	3,9238	5,2192	7,6500
271	47,2813	4,9327	5,8296	5,2691	4,0359	3,9238	3,9238	4,9327	4,9327	3,8117	4,6213	8,6063
310	41,6500	5,7175	5,8296	4,8206	5,1570	6,0538	5,6054	2,9148	2,9148	2,5785	4,6213	9,1375
350	44,0938	5,0448	5,3812	5,2691	3,9238	3,3632	2,8027	2,4664	4,0359	4,4843	4,0857	7,0125
390	34,8500	5,2691	4,5964	4,4843	6,3901	5,8296	6,0538	4,8206	2,2422	1,7937	4,6089	7,5438
430	31,1313	4,8206	4,8206	4,5964	5,2691	7,6233	6,7265	5,1570	4,0359	3,6996	5,1943	8,1813
470	31,1313	4,3722	6,1659	6,1659	4,7085	4,1480	5,7175	6,6143	4,9327	3,3632	5,1320	7,9688
511	46,9625	5,8296	4,9327	5,6054	5,2691	4,9327	5,6054	5,1570	4,4843	4,8206	5,1819	7,2250
550	38,0375	4,8206	5,7175	5,3812	5,0448	4,8206	5,2691	5,8296	5,3812	4,7085	5,2192	7,3313
590	42,5000	4,9327	4,8206	5,3812	4,5964	4,4843	4,3722	4,5964	4,3722	4,0359	4,6213	7,8625
630	39,4188	5,4933	5,9417	6,9507	4,3722	4,0359	4,2601	5,7175	4,2601	2,6906	4,8580	7,8625
670	42,2875	4,7085	5,4933	5,6054	6,1659	6,6143	4,8206	4,5964	4,4843	3,8117	5,1445	7,0125
713	39,8438	5,4933	4,9327	3,8117	4,5964	5,8296	6,1659	5,2691	4,2601	3,1390	4,8331	7,9688
750	37,6125	4,9327	4,8206	4,9327	4,1480	3,9238	3,8117	4,2601	5,4933	4,0359	4,4843	7,0125
791	38,3563	5,9417	5,9417	5,0448	5,8296	5,0448	4,4843	4,3722	5,3812	5,4933	5,2815	8,2875
830	32,6188	5,1570	5,0448	5,3812	6,7265	7,0628	5,9417	5,4933	5,3812	5,6054	5,7549	8,3938
870	41,6500	5,8296	5,1570	5,2691	5,6054	6,9507	4,5964	2,3543	3,1390	2,8027	4,6338	7,6500
875	32,5125	5,6054	4,9327	5,1570	6,5022	6,0538	6,8386	6,0538	5,4933	2,5785	5,4684	8,5000
mitja	31,3391	4,1561	4,2394	4,2065	4,1179	4,2930	4,1281	3,9188	3,6528	3,1390	4,9328	6,2922
dispersió	8,9343	1,1233	1,1577	1,1700	1,2477	1,4754	1,3874	1,4584	1,2211	1,2093	1,0650	1,6790

Taula 12: Obtenció dels paràmetres de $P_{atm} = 0,64 \text{ atm}$ (primera presa de dades).

nº imatge	punt a		punt b			
	ax	ay	bx	by	dy [píxels]	L [cm]
150	374	1004	374	677	327	34,7438
190	343	1002	343	591	411	43,6688
232	379	1004	379	640	364	38,6750
271	379	993	379	548	445	47,2813
310	381	990	381	598	392	41,6500
350	365	1009	365	594	415	44,0938
390	346	1005	346	638	328	34,8500
430	376	1000	376	672	293	31,1313
470	351	1002	351	709	293	31,1313
510	380	1005	380	563	442	46,9625
550	352	1005	352	647	358	38,0375
590	341	1007	341	607	400	42,5000
630	380	1003	380	632	371	39,4188
670	344	1011	344	613	398	42,2875
713	350	1000	350	625	375	39,8438
750	350	1010	350	656	354	37,6125
791	336	997	336	636	361	38,3563
830	358	997	358	690	307	32,6188
870	350	1003	350	611	392	41,6500
875	353	996	353	690	306	32,5125
384	342	992	342	620	372	39,5250
480	357	1000	354	621	379	40,2688
580	352	1009	352	621	388	41,2250
680	342	996	342	611	385	40,9063
790	351	1011	351	624	387	41,1188
151	366	1006	366	591	415	44,0938
152	356	1011	356	559	452	48,0250
153	356	1009	356	689	320	34,0000
154	354	1011	354	613	398	42,2875
155	349	1012	349	563	449	47,7063
156	356	1005	356	625	380	40,3750
157	366	991	366	620	371	39,4188
158	353	997	353	627	370	39,3125
161	350	997	350	614	383	40,6938
162	355	1006	355	614	392	41,6500
164	358	1010	358	692	318	33,7875
165	344	1003	344	621	382	40,5875
166	344	998	344	611	387	41,1188
167	341	995	341	629	366	38,8875
						39,8465
						4,3387

Taula 13: Determinació de L (ampliació de dades, $P_{atm} = 0,64 \text{ atm}$).

nº imatge	punt a		punt i		dy [píxels]	S [cm]
	ax	ay	ix	iy		
150	365	1077	365	1006	71	7,5438
190	355	1077	355	1002	75	7,9688
232	355	1077	355	1005	72	7,6500
271	365	1077	365	996	81	8,6063
310	355	1077	355	991	86	9,1375
350	354	1077	354	1011	66	7,0125
390	354	1077	354	1006	71	7,5438
430	355	1077	355	1000	77	8,1813
470	355	1077	355	1002	75	7,9688
510	355	1077	355	1009	68	7,2250
550	354	1078	354	1005	69	7,3313
590	355	1077	355	1008	74	7,8625
630	355	1077	355	1003	74	7,8625
670	356	1077	356	1011	66	7,0125
713	353	1075	353	1000	75	7,9688
750	356	1076	356	1010	66	7,0125
791	354	1076	354	998	78	8,2875
830	356	1077	356	998	79	8,3938
870	355	1076	355	1004	72	7,6500
875	356	1077	356	997	80	8,5000
384	354	1077	354	992	85	9,0313
480	354	1077	354	1000	77	8,1813
580	354	1077	354	1003	74	7,8625
680	355	1076	355	995	81	8,6063
790	354	1077	354	1002	75	7,9688
151	355	1077	355	1007	70	7,4375
152	354	1077	354	1012	65	6,9063
153	356	1077	356	1011	66	7,0125
154	356	1077	356	1010	67	7,1188
155	355	1078	355	1013	65	6,9063
156	356	1077	356	1006	71	7,5438
157	355	1077	355	992	85	9,0313
158	354	1078	354	998	80	8,5000
161	354	1077	354	999	78	8,2875
162	355	1077	355	1006	71	7,5438
164	356	1076	356	1010	66	7,0125
165	355	1077	355	1002	75	7,9688
166	355	1077	355	998	79	8,3938
167	355	1077	355	997	80	8,5000
						7,8598
						0,6331

Taula 14: Determinació de S (ampliació de dades, $P_{atm} = 0,64 \text{ atm}$).

nº imatge	L [cm]	D10 [cm]	D20 [cm]	D30 [cm]	D40 [cm]	D50 [cm]	D60 [cm]	D70 [cm]	D80 [cm]	D90 [cm]	D [cm]	S [cm]
150	37,9313	4,4625	3,7188	4,4625	4,7813	4,3563	4,6750	4,7813	4,7813	3,6125	4,4035	6,375
190	45,6875	4,4843	4,5964	4,1480	4,3722	4,9327	6,1659	4,3722	6,8386	7,0628	5,2192	5,63125
230	44,4125	4,7085	5,0448	7,3991	6,5022	4,2601	3,8117	4,0359	3,6996	3,1390	4,7334	5,95
270	41,2250	4,9327	4,3722	4,4843	4,4843	4,9327	6,0538	7,5112	4,9327	3,3632	5,0075	5,4188
311	38,3563	4,4843	5,1570	5,2691	4,1480	3,6996	4,7085	4,9327	6,9507	8,0717	5,2691	6,0563
350	31,0250	4,2601	5,0448	4,3722	5,8296	6,8386	5,7175	4,4843	4,3722	4,0359	4,9950	5,9500
390	40,0563	3,8117	4,7085	3,9238	5,0448	4,7085	4,8206	4,1480	4,8206	3,5874	4,3971	6,3750
430	32,4063	3,3632	4,5964	5,1570	5,4933	5,1570	5,8296	7,5112	7,1749	6,6143	5,6552	4,8875
470	43,6688	4,1480	5,2691	4,4843	4,5964	4,3722	4,8206	5,1570	3,8117	2,6906	4,3722	4,8875
511	40,1625	3,5874	3,6996	3,6996	4,1480	4,0359	4,8206	5,6054	5,6054	3,6996	4,3224	6,1625
550	45,0500	3,4753	4,7085	4,7085	4,0359	3,9238	3,6996	2,6906	4,2601	4,4843	3,9985	4,6750
590	47,2813	3,8117	4,7085	6,2780	5,2691	4,8206	5,4933	6,8386	3,3632	2,9148	4,8331	4,9938
630	47,8125	4,5964	4,9327	5,7175	5,0448	5,4933	3,8117	3,1390	3,3632	4,3722	4,4968	6,1625
670	40,3750	3,6996	3,9238	5,1570	5,1570	3,9238	3,2511	2,8027	4,1480	4,2601	4,0359	4,6750
710	44,3063	4,3722	4,2601	4,3722	6,1659	5,4933	5,7175	4,4843	5,9417	4,0359	4,9826	5,3125
750	52,0625	4,1480	5,3812	5,0448	4,8206	5,1570	4,7085	4,7085	3,8117	3,4753	4,5840	5,2063
790	40,8000	4,5964	4,5964	4,1480	4,4843	5,3812	6,6143	5,9417	6,0538	5,1570	5,2192	5,6313
830	46,1125	4,1480	5,8296	6,0538	6,7265	4,1480	3,2511	5,4933	7,7354	7,1749	5,6178	5,6313
870	44,8375	2,8027	4,0359	4,4843	3,9238	3,8117	4,8206	6,1659	4,5964	3,8117	4,2725	4,6750
875	42,6063	3,9238	5,0448	4,7085	6,0538	4,5964	4,2601	5,4933	5,6054	3,8117	4,8331	5,6313
mitja	40,4898	3,9498	4,4761	4,7435	4,7787	4,4612	4,5951	4,7518	4,8953	4,3463	4,7253	5,3253
dispersió	4,6541	0,4924	0,5242	0,8407	0,7847	0,7268	0,9396	1,2910	1,2969	1,4990	0,4479	0,6091

Taula 15: Obtenció dels paràmetres de $P_{am} = 0,8 \text{ atm}$ (primera presa de dades).

nº imatge	punt a		punt b		Dy [píxels]	L [cm]
	ax	ay	bx	by		
150	357	1015	357	658	357	37,9313
190	359	1023	359	593	430	45,6875
230	357	1016	357	598	418	44,4125
270	348	1023	348	635	388	41,2250
311	357	1017	357	656	361	38,3563
350	357	1019	357	727	292	31,0250
390	361	1017	361	640	377	40,0563
430	358	1025	358	720	305	32,4063
470	357	1028	357	617	411	43,6688
511	357	1015	357	637	378	40,1625
550	355	1029	355	605	424	45,0500
590	350	1028	350	583	445	47,2813
630	357	1015	357	565	450	47,8125
670	355	1028	355	648	380	40,3750
710	353	1022	353	605	417	44,3063
750	360	1025	360	535	490	52,0625
790	347	1020	347	636	384	40,8000
830	357	1020	357	586	434	46,1125
870	355	1028	355	606	422	44,8375
875	356	1022	356	621	401	42,6063
380	346	1032	346	631	401	42,6063
480	346	1013	346	657	356	37,8250
586	347	1022	347	624	398	42,2875
680	354	1023	354	615	408	43,3500
780	362	1024	362	594	430	45,6875
151	345	1017	345	590	427	45,3688
152	359	1020	359	678	342	36,3375
154	362	1031	362	637	394	41,8625
155	358	1022	358	611	411	43,6688
156	355	1019	355	656	363	38,5688
157	344	1012	344	602	410	43,5625
158	347	1008	347	618	390	41,4375
160	343	1015	343	611	404	42,9250
161	344	1018	344	578	440	46,7500
162	346	1023	346	592	431	45,7938
164	345	1023	345	644	379	40,2688
165	348	1024	348	581	443	47,0688
166	345	1025	345	591	434	46,1125
169	354	1026	354	647	379	40,2688
						42,5109
						4,1343

Taula 16: Determinació de L (ampliació de dades, $P_{atm} = 0,8 \text{ atm}$).

nº imatge	punt a		punt i		dy [píxels]	S [cm]
	ax	ay	ix	iy		
150	357	1015	357	1075	60	6,3750
190	359	1023	359	1076	53	5,6313
230	357	1016	357	1072	56	5,9500
270	348	1023	348	1074	51	5,4188
311	357	1017	357	1074	57	6,0563
350	357	1019	357	1075	56	5,9500
390	361	1017	361	1077	60	6,3750
430	358	1025	358	1071	46	4,8875
470	357	1028	357	1074	46	4,8875
511	357	1015	357	1073	58	6,1625
550	355	1029	355	1073	44	4,6750
590	350	1028	350	1075	47	4,9938
630	357	1015	357	1073	58	6,1625
670	355	1028	355	1072	44	4,6750
710	353	1022	353	1072	50	5,3125
750	360	1025	360	1074	49	5,2063
790	347	1020	347	1073	53	5,6313
830	357	1020	357	1073	53	5,6313
870	355	1028	355	1072	44	4,6750
875	356	1022	356	1075	53	5,6313
380	355	1031	355	1075	44	4,6750
480	355	1012	355	1075	63	6,6938
586	353	1022	353	1076	54	5,7375
680	353	1022	353	1076	54	5,7375
780	353	1024	353	1076	52	5,5250
151	353	1076	353	1018	58	6,1625
152	353	1076	353	1019	57	6,0563
154	354	1076	354	1032	44	4,6750
155	354	1077	354	1022	55	5,8438
156	356	1077	356	1021	56	5,9500
157	354	1075	354	1014	61	6,4813
158	356	1075	356	1012	63	6,6938
160	356	1076	356	1015	61	6,4813
161	354	1074	354	1019	55	5,8438
162	354	1076	354	1025	51	5,4188
164	354	1075	354	1024	51	5,4188
165	354	1077	354	1026	51	5,4188
166	354	1076	354	1026	50	5,3125
169	355	1076	355	1027	49	5,2063
						5,6313
						0,5911

Taula 17: Determinació de S (ampliació de dades, $P_{atm} = 0,8 \text{ atm}$).

nº imatge	L [cm]	D10 [cm]	D20 [cm]	D30 [cm]	D40 [cm]	D50 [cm]	D60 [cm]	D70 [cm]	D80 [cm]	D90 [cm]	D [cm]	S [cm]
150	46,75	3,61	4,04	4,46	3,93	3,72	4,99	3,29	2,76	3,19	3,78	5,10
190	42,18	3,92	4,48	4,82	4,71	3,14	3,48	4,93	6,61	3,48	4,40	5,21
230	43,35	3,48	4,48	4,26	5,27	5,38	5,61	6,50	4,26	2,24	4,61	4,14
270	46,75	4,37	4,04	3,92	4,15	5,38	4,15	4,15	2,58	2,47	3,91	4,36
310	40,91	4,04	4,37	4,93	3,92	3,92	6,39	6,17	6,84	3,92	4,95	5,10
350	46,11	3,36	3,48	4,48	4,60	6,28	5,27	2,13	1,79	1,68	3,67	4,99
390	47,71	3,03	3,36	3,70	3,48	5,27	3,36	5,49	7,74	6,28	4,63	3,29
430	43,56	3,59	3,48	4,26	5,83	5,04	7,17	6,73	3,70	1,91	4,63	4,04
470	42,61	4,26	3,81	4,71	6,17	4,48	4,04	4,71	4,71	6,17	4,78	5,31
511	38,68	3,81	4,26	3,70	5,61	4,26	3,92	5,16	6,84	5,27	4,76	5,31
550	51,11	3,92	4,26	4,26	3,14	5,16	5,94	2,58	3,48	3,25	4,00	3,83
590	38,57	3,48	4,15	4,04	4,60	5,38	4,37	5,49	5,94	5,61	4,78	3,51
630	43,67	3,70	3,92	4,71	5,61	5,04	3,92	5,38	4,60	4,37	4,58	4,57
670	38,04	3,59	3,81	4,26	4,48	3,48	3,70	5,94	4,48	5,27	4,33	4,36
710	40,69	3,25	4,71	3,81	4,60	4,71	5,38	7,40	6,95	4,26	5,01	4,36
750	37,93	3,25	4,04	3,92	4,37	4,93	4,82	4,26	6,84	8,07	4,95	3,51
790	44,52	3,92	4,71	5,04	4,37	4,48	4,26	4,82	5,49	4,37	4,61	4,46
830	44,09	4,04	5,16	4,15	3,14	4,15	5,61	6,84	4,60	4,26	4,66	4,99
870	38,78	3,48	4,15	4,15	4,26	5,16	7,17	5,83	5,72	4,48	4,93	4,04
875	44,73	3,70	4,15	4,37	4,82	6,73	5,27	4,04	3,81	4,60	4,61	3,83
mitja	40,80	3,50	3,94	4,08	4,31	4,47	4,68	4,89	4,80	4,03	4,52	4,22
dispersió	3,70	0,36	0,46	0,41	0,86	0,78	1,17	1,41	1,70	1,64	0,41	0,64

Taula 18: Obtenció dels paràmetres de $P_{atm} = 0,9 \text{ atm}$ (primera presa de dades).

nº imatge	punt a		punt b		dy [píxels]	L [cm]
	ax	ay	bx	by		
150	352	1030	352	590	440	46,7500
190	358	1027	358	630	397	42,1813
230	339	1037	339	629	408	43,3500
270	344	1033	344	593	440	46,7500
310	357	1026	357	641	385	40,9063
350	364	1029	364	595	434	46,1125
390	360	1043	360	594	449	47,7063
430	344	1037	344	627	410	43,5625
470	347	1035	347	634	401	42,6063
511	336	1024	336	660	364	38,6750
550	373	1033	373	552	481	51,1063
590	339	1040	339	677	363	38,5688
630	339	1031	339	620	411	43,6688
670	343	1033	343	675	358	38,0375
710	341	1031	341	648	383	40,6938
750	360	1042	360	685	357	37,9313
790	373	1031	373	612	419	44,5188
830	346	1025	346	610	415	44,0938
870	341	1034	341	669	365	38,7813
875	364	1037	364	616	421	44,7313
151	347	1034	347	540	494	52,4875
152	348	1031	348	553	478	50,7875
154	346	1031	346	613	418	44,4125
155	345	1028	345	659	369	39,2063
156	361	1032	361	618	414	43,9875
157	358	1038	358	600	438	46,5375
158	353	1036	353	593	443	47,0688
160	352	1032	352	658	374	39,7375
161	358	1034	358	604	430	45,6875
162	346	1034	346	622	412	43,7750
164	361	1034	361	704	330	35,0625
165	356	1031	356	653	378	40,1625
166	351	1030	351	535	495	52,5938
169	362	1030	362	640	390	41,4375
						43,6375
						4,3251

Taula 19: Determinació de L (ampliació de dades, $P_{atm} = 0,9 \text{ atm}$).

nº imatge	punt a		punt i		dy [píxels]	S [cm]
	ax	ay	ix	iy		
150	359	1076	359	1028	48	5,1000
190	358	1076	358	1027	49	5,2063
230	353	1075	353	1036	39	4,1438
270	359	1073	359	1032	41	4,3563
310	359	1075	359	1027	48	5,1000
350	359	1076	359	1029	47	4,9938
390	359	1074	359	1043	31	3,2938
430	362	1076	362	1038	38	4,0375
470	350	1073	350	1023	50	5,3125
511	366	1076	366	1026	50	5,3125
550	352	1070	352	1034	36	3,8250
590	367	1074	367	1041	33	3,5063
630	353	1075	353	1032	43	4,5688
670	355	1075	355	1034	41	4,3563
710	352	1073	352	1032	41	4,3563
750	355	1075	355	1042	33	3,5063
790	353	1073	353	1031	42	4,4625
830	353	1075	353	1028	47	4,9938
870	354	1073	354	1035	38	4,0375
874	364	1072	364	1036	36	3,8250
151	355	1075	355	1034	44	4,6750
152	352	1075	352	1031	63	6,6938
154	353	1075	353	1031	54	5,7375
155	353	1075	353	1029	54	5,7375
156	355	1075	355	1031	52	5,5250
157	352	1075	352	1039	36	3,8250
158	354	1076	354	1036	40	4,2500
160	355	1075	355	1032	43	4,5688
161	354	1075	354	1036	39	4,1438
162	352	1075	352	1033	42	4,4625
164	355	1075	355	1036	39	4,1438
165	355	1075	355	1031	44	4,6750
166	353	1075	353	1030	45	4,7813
169	354	1076	354	1030	46	4,8875
						4,6000
						0,7312

Taula 20: Determinació de S (ampliació de dades, $P_{atm} = 0,9 \text{ atm}$).

nº imatge	L [cm]	D10 [cm]	D20 [cm]	D30 [cm]	D40 [cm]	D50 [cm]	D60 [cm]	D70 [cm]	D80 [cm]	D90 [cm]	D [cm]
150	46,3250	1,8063	2,2313	3,0813	3,9313	3,9313	3,7188	5,7375	5,4188	5,9500	3,9785
190	45,9000	1,7937	2,6906	3,4753	3,4753	3,4753	5,1570	6,2780	5,8296	7,2870	4,3847
230	54,8250	1,7937	2,5785	3,5874	3,3632	4,3722	6,6143	4,7085	2,9148	4,9327	3,8739
270	47,9188	1,7937	2,3543	3,4753	4,2601	4,4843	3,5874	4,8206	6,8386	7,3991	4,3348
310	43,9875	2,0179	2,5785	3,2511	4,4843	3,2511	5,4933	5,4933	7,0628	5,9417	4,3971
350	42,9250	2,9148	2,5785	3,1390	3,6996	4,3722	4,3722	6,3901	6,0538	6,0538	4,3971
390	42,9250	1,6816	2,1300	3,2511	3,8117	4,4843	4,3722	6,5022	5,9417	6,1659	4,2601
430	46,9625	1,6816	2,2422	3,0269	4,1480	4,2601	4,4843	4,1480	5,6054	2,6906	3,5874
472	47,8125	1,5695	2,5785	3,6996	3,6996	4,0359	4,8206	5,4933	6,0538	8,2960	4,4718
510	53,3375	2,0179	2,8027	3,5874	4,1480	3,9238	4,3722	6,5022	5,4933	4,3722	4,1355
550	36,3375	1,3453	2,2422	3,0269	3,3632	3,4753	4,4843	4,3722	7,0628	9,8655	4,3597
590	49,6188	1,7937	2,8027	3,2511	3,9238	5,1570	5,3812	3,3632	2,5785	6,0538	3,8117
631	47,9188	2,0179	2,9148	3,8117	4,3722	4,0359	3,9238	6,1659	8,0717	5,6054	4,5466
670	47,9188	1,7937	3,3632	3,9238	4,2601	4,0359	3,9238	6,1659	7,8475	5,4933	4,5341
711	53,1250	2,0179	3,2511	4,8206	4,4843	5,6054	3,1390	4,8206	4,0359	2,2422	3,8241
750	44,4125	1,6816	2,6906	3,4753	4,5964	5,3812	4,2601	4,2601	4,2601	4,8206	3,9362
790	48,4500	1,7937	2,6906	3,8117	4,0359	4,1480	6,9507	6,6143	4,2601	7,2870	4,6213
830	40,6938	1,4574	2,9148	3,0269	4,1480	4,3722	4,0359	5,6054	6,5022	3,5874	3,9611
870	46,3250	1,5695	2,1300	3,6996	4,5964	3,1390	3,9238	4,8206	7,6233	4,3722	3,9860
874	41,8625	1,5695	2,6906	3,4753	3,9238	5,6054	5,6054	5,4933	5,8296	5,1570	4,3722
mitja	46,4791	1,8056	2,6228	3,4949	4,0362	4,2773	4,6310	5,3878	5,7642	5,6787	4,1887
dispersió	4,4520	0,3210	0,3407	0,4216	0,3848	0,7147	0,9805	0,9337	1,5286	1,8253	0,2964

Taula 21: Obtenció dels paràmetres de $P_{atm} = 1 \text{ atm}$ (primera presa de dades).

nº imatge	punt a		punt b		dy [píxels]	L [cm]
	ax	ay	bx	by		
150	350	1072	350	636	436	46,3250
190	350	1072	350	640	432	45,9000
230	350	1072	350	556	516	54,8250
270	350	1072	350	621	451	47,9188
310	350	1072	350	658	414	43,9875
350	350	1072	350	668	404	42,9250
390	350	1072	350	668	404	42,9250
430	350	1072	350	630	442	46,9625
472	350	1072	350	622	450	47,8125
510	350	1072	350	570	502	53,3375
550	350	1072	350	730	342	36,3375
590	350	1072	350	605	467	49,6188
631	350	1072	350	621	451	47,9188
670	350	1072	350	621	451	47,9188
711	350	1072	350	572	500	53,1250
750	350	1072	350	654	418	44,4125
790	350	1072	350	616	456	48,4500
830	350	1072	350	689	383	40,6938
870	350	1072	350	636	436	46,3250
874	350	1072	350	678	394	41,8625
151	350	1072	350	551	521	55,3563
152	350	1072	350	662	410	43,5625
154	350	1072	350	568	504	53,5500
155	350	1072	350	650	422	44,8375
156	350	1072	350	561	511	54,2938
157	350	1072	350	648	424	45,0500
158	350	1072	350	596	476	50,5750
160	350	1072	350	615	457	48,5563
161	350	1072	350	630	442	46,9625
162	350	1072	350	586	486	51,6375
164	350	1072	350	613	459	48,7688
165	350	1072	350	536	536	56,9500
166	350	1072	350	675	397	42,1813
169	350	1072	350	618	454	48,2375
						47,6500
						4,6628

Taula 22: Determinació de L (ampliació de dades, $P_{atm} = 1 \text{ atm}$).

8.2.2. Model 1 i correlacions obtingudes segons P

El tractament de dades realitzat en les dimensions del doll de foc, per a veure quin efecte té la pressió atmosfèrica en la geometria, es pot resumir en la següent taula:

P [atm]	D [cm]	L [cm]	S [cm]
0,64	4,93	39,84	7,85
0,8	4,76	42,51	5,63
0,9	4,52	43,63	4,60
1	4,18	47,65	

Taula 23: Resum de les dades en relació amb el model 1.

La variació de les dimensions del doll de foc en funció de la pressió atmosfèrica s'ha representat en les següents figures adjuntes.

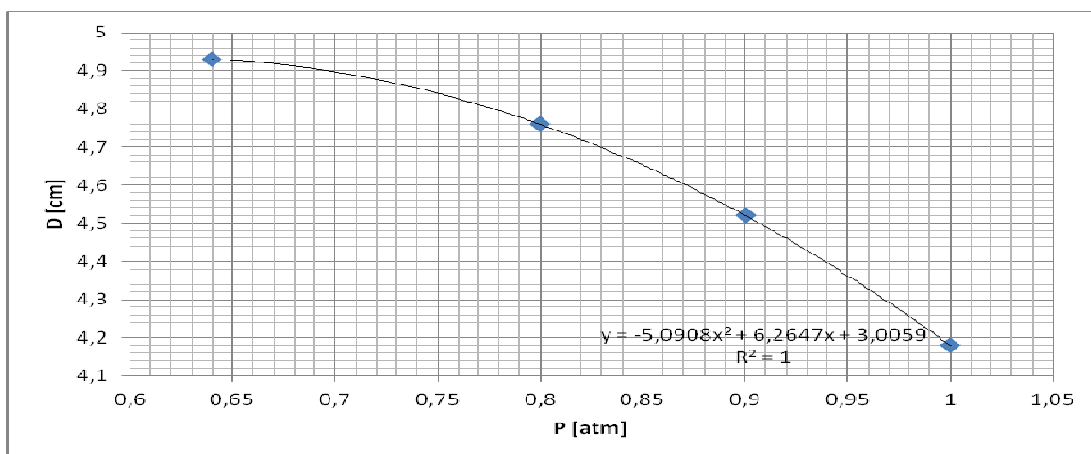


Figura 15: Variació del diàmetre del doll de foc en funció de la pressió atmosfèrica.

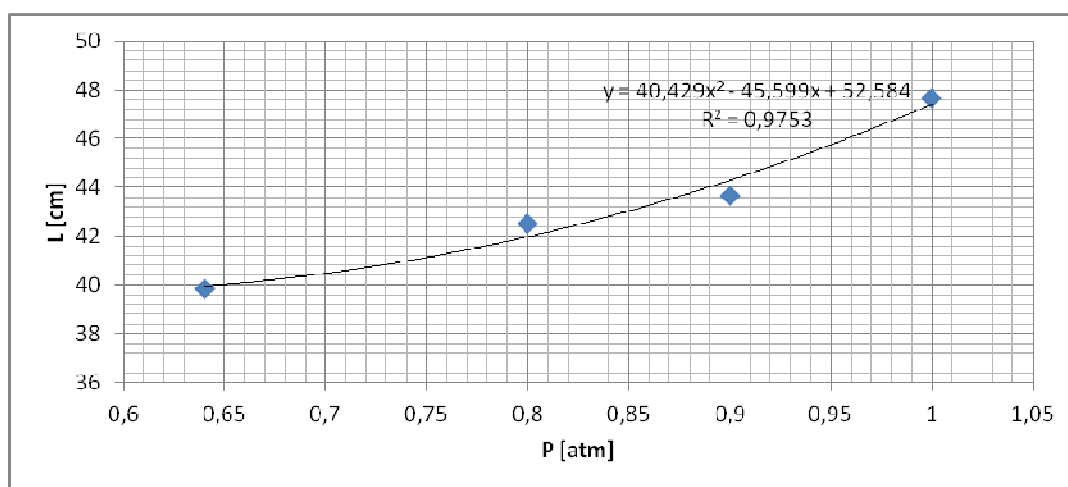


Figura 16: Variació de la longitud del doll en funció de la pressió atmosfèrica.

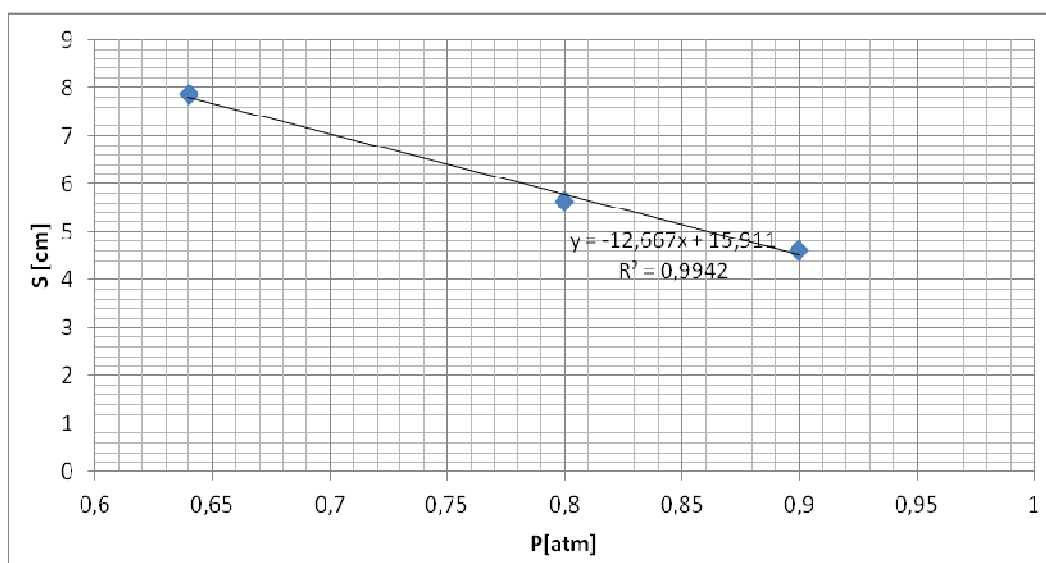


Figura 17: Variació de la distància d'elevació en funció de la pressió atmosfèrica.

Al representar gràficament els diferents paràmetres del model 1, es poden observar les següents tendències:

- a) El diàmetre del doll de foc decreix de forma quadràtica en funció de pressió atmosfèrica, observant-se una disminució més abrupta a mesura que ens desplacem a valors de P_{atm} més elevats (Figura 15)
- b) La longitud del doll de foc augmenta de forma quadràtica amb la pressió atmosfèrica, observant-se un increment més abrupte a mesura que ens desplacem a valors de P_{atm} més elevats (Figura 16).
- c) La longitud de la distància d'elevació disminueix linealment en funció de P_{atm} . En aquesta gràfica el punt (1,0) no s'ha mostrat, ja que altera la regressió donant valors de R^2 inferiors a 0,9. Podem afirmar que en el rang de valors entre 0,64 i 0,9 atm el comportament es pot associar a la linealitat, mentre que el tram de 0,9 a 1 atm no podem definir el seu comportament. En aquest tram s'han de dur un seguit d'experiències addicionals per a denotar el seu comportament (veure Figura 17).

Les equacions que defineixen el model 1 són:

$$D = -5,0908 \cdot P^2 + 6,2647 \cdot P + 3,0059 \quad (\text{Eq. 8.1})$$

$$L = 40,429 \cdot P^2 - 45,599 \cdot P + 52,584 \quad (\text{Eq. 8.2})$$

$$S = -12,667 \cdot P + 15,911 \quad (\text{Eq. 8.3})$$

8.2.3. Correcció del model

Les prediccions de les equacions presentades en l'anterior apartat presenten un cert error en relació amb els valors experimentals, ja que el valor de R^2 no és igual a 1. Per a obtenir un model segur, es valora l'error i es modifiquen els valors obtinguts amb un factor de correcció.

Pel que fa al paràmetre D, es considera que té un ajust suficient per a no haver d'utilitzar cap factor de conversió.

El paràmetre L, presenta un percentatge d'error baix però es considera convenient corregir-lo. Per a corregir la diferència entre el valor real i l'estimat pel model el multiplicarem per un factor de correcció igual a la màxima relació entre L_{real}/L_{model} .

Pr [atm]	Lr [cm]	Lm [cm]	error L	error %	factor corrector
0,64	39,8465	39,9604	0,1139	0,2858	0,9972
0,8	42,5109	41,9794	0,5315	1,2504	1,0127
0,9	43,6375	44,2924	0,6549	1,5008	0,9852
1	47,6500	47,4140	0,2360	0,4953	1,0050

Taula 24: Determinació fcL (factor de correcció L).

Per tant l'Eq. 8.2 quedarà multiplicada per $fcL=1,01$.

Aplicant el mateix criteri al paràmetre S:

Pr [atm]	Sr [cm]	Sm [cm]	error S	error %	factor corrector
0,6400	7,8598	7,8041	0,0557	0,7081	1,0071
0,8000	5,6313	5,7774	0,1462	2,5953	0,9747
0,9000	4,6000	4,5107	0,0893	1,9413	1,0198
1,0000					

Taula 25: determinació fcS (factor de correcció S).

Per tant l'Eq. 8.3 quedarà multiplicada per $fcS=1,02$.

8.2.4. Model 1 corregit i consideracions en la seva aplicació

El model amb la correcció desenvolupada en l'apartat anterior queda doncs de la següent manera:

$$D = -5,0908 \cdot P^2 + 6,2647 \cdot P + 3,0059 \quad (\text{Eq. 8.4})$$

$$L = 1,01 \cdot (40,429 \cdot P^2 - 45,599 \cdot P + 52,584) \quad (\text{Eq. 8.5})$$

$$S = 1,02 \cdot (-12,667 \cdot P + 15,911) \quad (\text{Eq. 8.6})$$

A l'hora d'utilitzar aquest model s'han de tenir en compte una sèrie de consideracions, atès que si no es compleixen les condicions establertes el model no es vàlid:

1.- Fluid = metà (Ara bé que probablement l'error en aplicar-lo a un altre combustible com, per exemple, propà, l'error no hauria de ser gaire gran).

2.- Aquest model només s'hauria d'utilitzar estrictament en fuites pròximes a un $D_{or} = 3$ mm; també es podrà utilitzar en orificis de $D_{or} < 3$ mm, ja que al disminuir el D_{or} els paràmetres crítics del model disminuiran (vegeu [9], pàg 831, Figura 8). (Ara bé, probablement en diàmetres d'orifici lleugerament superiors l'error introduït no ha de ser

gaire gran).

3.-Cal considerar un factor de seguretat, considerant que el model no s'ajusta a les condicions més crítiques en la geometria.

4.-Fluid subsònic.

5.-Situació en calma, és a dir, $u_w = 0$ m/s.

8.3. Model 2: Figura geomètrica que comprèn cilindre i con

Un altre model que es planteja en aquest projecte és la modelització del doll de foc com una figura geomètrica composta. Aquesta constaria de dues figures geomètriques simples: cilindre més con, on la geometria del cilindre vindria determinada per les equacions del model 1 amb certes modificacions.

El model quedarà especificat pels següents paràmetres:

1.- Distància d'elevació, $[S]$ = distància entre el punt de referència (punt de sortida del combustible) i el punt inferior del doll de foc.

2.- Longitud doll de foc, $[L]$ = distància entre els dos punts extrems del doll de la flama.

3.- Diàmetre equivalent del cilindre, $[D_i]$ = diàmetre constant al llarg de L_1 .

4.- Longitud del cilindre del doll de foc, $[L_1]$ = distància entre els dos punt pertanyents a la generatriu que estan en la superfície inferior i superior del cilindre.

5.- Longitud del con del doll de foc, $[L_2]$ = distància entre els punts pertanyents a la generatriu, dels quals un és el que es troba en la superfície superior del cilindre i l'altre en el vèrtex del con.

6.- Percentatge de L que és geomètricament un cilindre, $[\%cil]$ = aquest paràmetre determina la distància entre els punts a i c.

7.- Radi del con, $[r_i]$ = radi del con en funció de la posició respecte el punt c.

8.- Generatriu del con, $[g]$.

Amb el punt de referència i els paràmetres anteriors el model queda totalment definit (veure Figura 18).

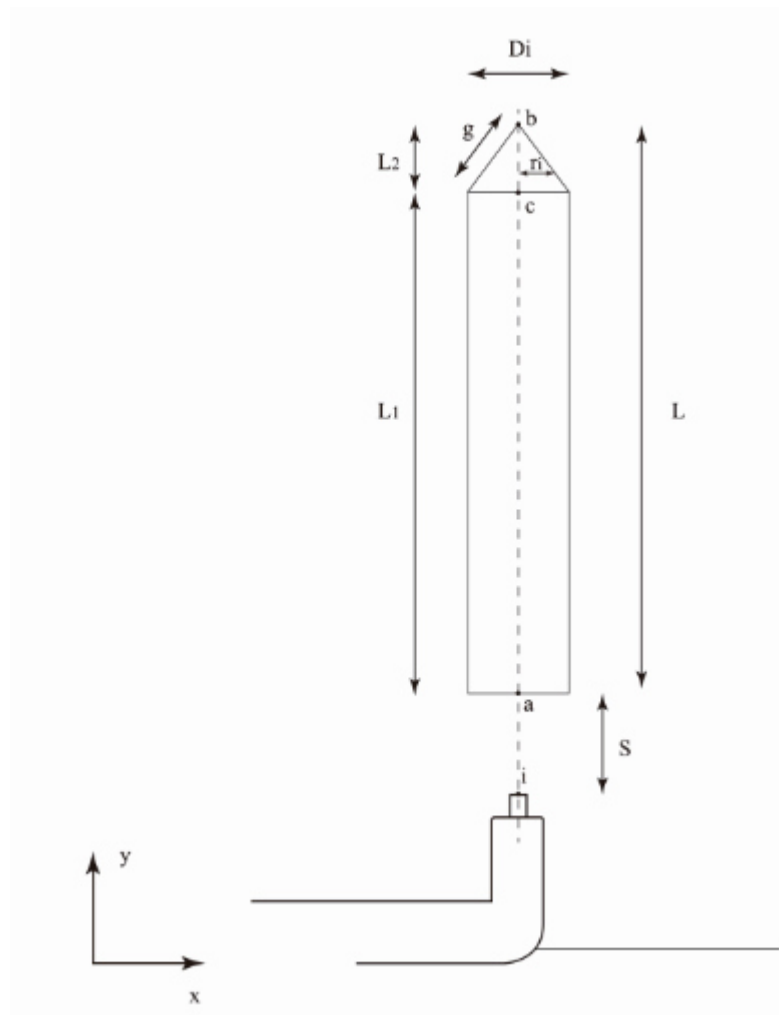


Figura 18: Esquema del model 2.

8.3.1. Tractament de dades per a obtenir els paràmetres del model

Aquest model es planteja com una extensió del model 1, amb la variació de considerar que tenim una part del doll de foc en l'extrem superior que es comporta des del punt de vista geomètric com un con. El tractament del model 1 es considera acceptable per a modelitzar el cilindre, de manera que les equacions del model 1 s'utilitzaran també per a modelitzar les del model 2. Per a diferenciar en quin punt de la generatriu es produeix el canvi de geometria de cilindre a con, es realitza una inspecció visual de les imatges a diferents valors de P_{atm} . S'inspeccionen les imatges i es seleccionen les que mostren més significativament aquest comportament.

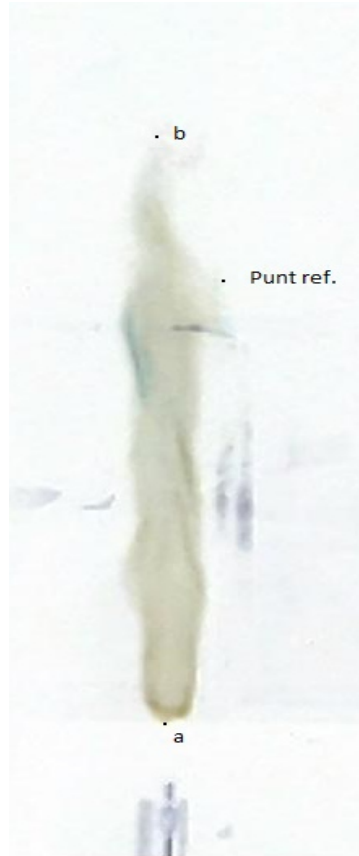


Figura 19: Exemple del tractament per a obtenir el model 2 (imatge 857, $P_{atm}=0,9 \text{ atm}$).

Procediment:

- 1.- Obtenció dels punts extrems del doll de foc (a,b) per a dimensionar L.
- 2.- Obtenció del punt de referència. El punt de referència és un punt que s'obté per inspecció visual i el caracteritzem com aquell punt que a mesura que augmenta la variable y , la ri disminueix. A més a més, ha de presentar certa simetria respecte a la generatriu. Cal tenir present que en cada imatge hi ha dos punts de referència, però amb un d'ells n'és suficient.
- 3.- Determinació de $L1$ i $\%cil$.
- 4.- Aquest procés es realitza per a cada P_{atm} i s'obté la mitjana aritmètica de forma arrodonida.

Del tractament desenvolupat anteriorment es van obtenir les següents dades:

nº imatge	Punt ref	punt a		punt b		dy1 [pixels]	dy2 [pixels]	L [cm]	L1 [cm]	% cil	
		ax	ay	bx	by						
511	346	714	341	1009	341	644	365	295	38,7813	31,3438	80,8219
517	385	723	358	1005	358	655	350	282	37,1875	29,9625	80,5714
521	400	757	342	1010	342	687	323	253	34,3188	26,8813	78,3282
527	337	755	342	1013	342	634	379	258	40,2688	27,4125	68,0739
532	372	679	355	1013	355	595	418	334	44,4125	35,4875	79,9043
533	373	654	344	1009	344	582	427	355	45,3688	37,7188	83,1382
539	347	698	350	1013	350	640	373	315	39,6313	33,4688	84,4504
557	390	814	361	1007	361	653	354	193	37,6125	20,5063	54,5198
558	381	736	350	1005	350	618	387	269	41,1188	28,5813	69,5090
559	392	726	343	997	343	602	395	271	41,9688	28,7938	68,6076
562	391	745	354	1001	354	642	359	256	38,1438	27,2000	71,3092
566	383	796	357	1000	357	666	334	204	35,4875	21,6750	61,0778
573	328	767	365	1006	365	636	370	239	39,3125	25,3938	64,5946
576	324	737	346	1012	346	631	381	275	40,4813	29,2188	72,1785
577	383	690	352	1013	352	555	458	323	48,6625	34,3188	70,5240
592	349	702	348	1013	348	630	383	311	40,6938	33,0438	81,2010
596	391	780	362	1010	362	657	353	230	37,5063	24,4375	65,1558
598	390	745	360	1002	360	656	346	257	36,7625	27,3063	74,2775
601	331	732	364	1004	364	640	364	272	38,6750	28,9000	74,7253
603	388	806	365	997	365	706	291	191	30,9188	20,2938	65,6357
											72,4302
											72

Taula 26: Tractament de dades per a $P_{atm}=0,64 \text{ atm}$.

punt a			punt b			dy1 [pixels]	dy2 [pixels]	L [cm]	L1 [cm]	% cil		
nº imatge	Punt ref	ax	ay	bx	by							
263	382	732	353	1022	353	630	392	290	41,6500	30,8125	73,9796	
267	327	735	342	1016	342	662	354	281	37,6125	29,8563	79,3785	
268	348	668	349	1022	349	608	414	354	43,9875	37,6125	85,5072	
272	391	699	352	1022	352	611	411	323	43,6688	34,3188	78,5888	
289	340	724	352	1018	352	659	359	294	38,1438	31,2375	81,8942	
295	323	758	347	1020	347	663	357	262	37,9313	27,8375	73,3894	
313	341	796	361	1017	361	709	308	221	32,7250	23,4813	71,7532	
317	390	744	356	1030	356	626	404	286	42,9250	30,3875	70,7921	
319	400	731	354	1023	354	616	407	292	43,2438	31,0250	71,7445	
327	390	738	344	1024	344	654	370	286	39,3125	30,3875	77,2973	
334	402	729	346	1020	346	617	403	291	42,8188	30,9188	72,2084	
339	322	773	346	1032	346	676	356	259	37,8250	27,5188	72,7528	
346	388	741	347	1021	347	639	382	280	40,5875	29,7500	73,2984	
352	387	781	358	1012	358	605	407	231	43,2438	24,5438	56,7568	
358	382	750	354	1030	354	641	389	280	41,3313	29,7500	71,9794	
361	324	700	354	1024	354	567	457	324	48,5563	34,4250	70,8972	
367	389	758	343	1028	343	629	399	270	42,3938	28,6875	67,6692	
370	343	734	349	1025	349	613	412	291	43,7750	30,9188	70,6311	
372	330	687	343	1023	343	571	452	336	48,0250	35,7000	74,3363	
374	336	774	350	1025	350	633	392	251	41,6500	26,6688	64,0306	
											72,9442	73

Taula 27: Tractament de dades per a $P_{atm}=0,8 \text{ atm}$.

nº imatge	Punt ref.	punt a		punt b			dy1 [píxels]	dy2 [píxels]	L [cm]	L1 [cm]	% cil
		ax	ay	bx	by						
507	320	362	1031	362	590		441	364	46,8563	38,6750	82,5397
512	379	354	1033	354	613		420	342	44,6250	36,3375	81,4286
518	391	345	1034	345	660		374	243	39,7375	25,8188	64,9733
521	337	360	1035	360	627		408	292	43,3500	31,0250	71,5686
524	391	344	1038	344	655		383	275	40,6938	29,2188	71,8016
527	344	351	1038	351	644		394	346	41,8625	36,7625	87,8173
530	387	345	1028	345	684		344	262	36,5500	27,8375	76,1628
533	331	356	1033	356	632		401	310	42,6063	32,9375	77,3067
538	351	344	1030	344	646		384	324	40,8000	34,4250	84,3750
540	372	345	1036	345	608		428	327	45,4750	34,7438	76,4019
542	329	345	1037	345	612		425	351	45,1563	37,2938	82,5882
549	386	386	1034	386	647		387	267	41,1188	28,3688	68,9922
553	332	332	1032	332	587		445	336	47,2813	35,7000	75,5056
554	375	375	1031	375	624		407	307	43,2438	32,6188	75,4300
556	334	334	1030	334	635		395	333	41,9688	35,3813	84,3038
557	314	314	1034	314	609		425	281	45,1563	29,8563	66,1176
563	343	343	1036	343	667		369	304	39,2063	32,3000	82,3848
568	330	330	1028	330	551		477	349	50,6813	37,0813	73,1656
569	345	345	1032	345	639		393	294	41,7563	31,2375	74,8092
575	385	385	1033	385	641		392	301	41,6500	31,9813	76,7857
											76,7229
											77

Taula 28: Tractament de dades per a $P_{atm} = 0,9 \text{ atm}$.

nº imatge	Punt ref.	punt a		punt b		dy1 [pixels]	dy2 [pixels]	L [cm]	L1 [cm]	% cil
		ax	ay	bx	by					
600	343	661	1072	356	614	458	411	48,6625	43,6688	89,7380
601	324	786	1072	356	694	378	286	40,1625	30,3875	75,6614
614	314	765	1072	356	693	379	307	40,2688	32,6188	81,0026
615	316	703	1072	356	639	433	369	46,0063	39,2063	85,2194
632	321	701	1072	356	593	479	371	50,8938	39,4188	77,4530
633	328	714	1072	356	652	420	358	44,6250	38,0375	85,2381
635	384	772	1072	356	720	352	300	37,4000	31,8750	85,2273
638	395	772	1072	356	709	363	300	38,5688	31,8750	82,6446
639	331	732	1072	356	666	406	340	43,1375	36,1250	83,7438
653	492	723	1072	356	648	424	349	45,0500	37,0813	82,3113
658	314	753	1072	356	671	401	319	42,6063	33,8938	79,5511
660	496	657	1072	356	572	500	415	53,1250	44,0938	83,0000
662	301	687	1072	356	603	469	385	49,8313	40,9063	82,0896
665	316	733	1072	356	651	421	339	44,7313	36,0188	80,5226
666	312	674	1072	356	588	484	398	51,4250	42,2875	82,2314
670	395	741	1072	356	653	419	331	44,5188	35,1688	78,9976
674	384	741	1072	356	675	397	331	42,1813	35,1688	83,3753
681	294	737	1072	356	622	450	335	47,8125	35,5938	74,4444
700	335	675	1072	356	609	463	397	49,1938	42,1813	85,7451
701	398	764	1072	356	681	391	308	41,5438	32,7250	78,7724
										82,8485
										83

Taula 29: Tractament de dades per a $P_{atm} = 1 atm$.

Per a cada grup d'imatges (escenaris a diferents valors de P_{atm}) es va realitzar un tractament de 20 imatges per a prendre una primera presa de dades de les diferents mostres. Es va procedir d'aquesta manera per a observar una primera tendència i després ampliar les dades per ajustar millor aquestes a una expressió matemàtica. Amb la primera presa de dades es va comprovar que hi havia poca dispersió, donant lloc a uns punts precisos que representen correctament la relació P-Pcf (punt de canvi de geometria).

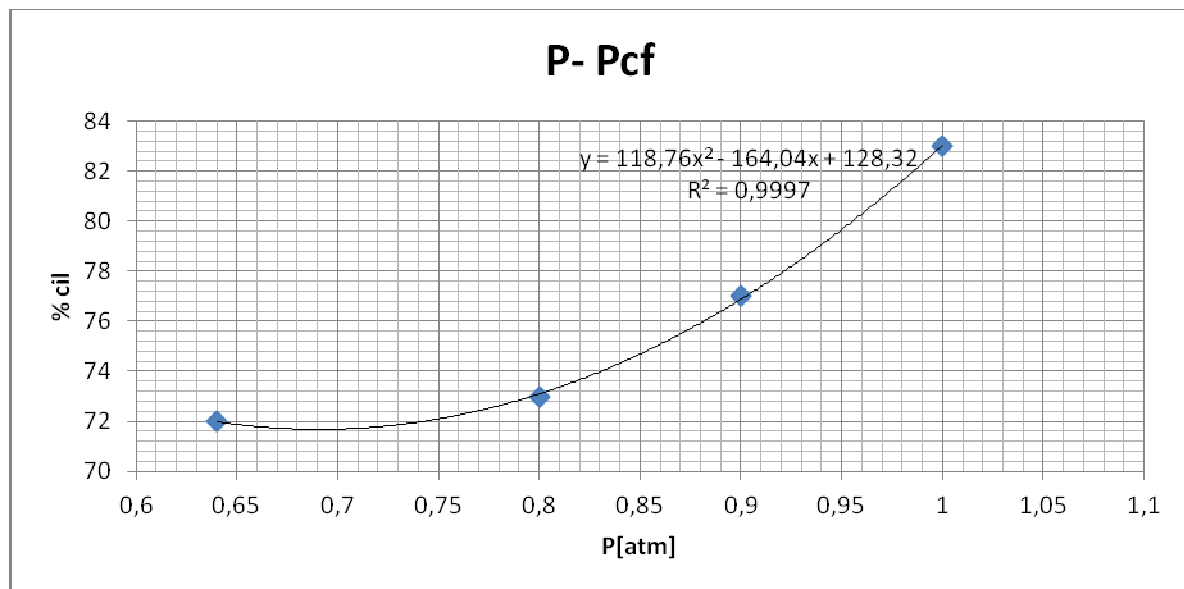


Figura 20: Gràfica P-Pcf (punt canvi de figura).

De la gràfica anterior obtenim l'expressió que ens indica la posició del punt c (veure Figura 18), on es fa el canvi de geometria de cilindre a con:

$$\%cil = (118,76 \cdot P^2 - 164,04 \cdot P + 128,32) \frac{1}{100} \quad (\text{Eq. 8.7})$$

8.3.2. Model 2 correlacions obtingudes segons el valor de P_{atm}

Seguidament es mostren les equacions emprades per a determinar la geometria del doll de foc segons el model 2. Es recomana seguir l'ordre de càlcul, tal com es presenten les equacions:

$$S = 1,02(-12,667 \cdot P + 15,911) \quad (\text{Eq. 8.6})$$

$$\%cil = (118,76 \cdot P^2 - 164,04 \cdot P + 128,32) \frac{1}{100} \quad (\text{Eq. 8.8})$$

$$L = 1,01(40,429 \cdot P^2 - 45,599 \cdot P + 52,584) \quad (\text{Eq. 8.5})$$

A partir de les Eqs.(8.8) i (8.5) obtenim L_1 i L_2 :

$$L_1 = \%cil \cdot L \quad (\text{Eq. 8.9})$$

$$L_2 = (1 - \%cil) \cdot L \quad (\text{Eq. 8.10})$$

$$D = -5,0908 \cdot P^2 + 6,2647 \cdot P + 3,0059 \quad (\text{Eq. 8.4})$$

$$g = \sqrt{\left(\frac{D_{eq}}{2}\right)^2 + (L_2)^2} \quad (\text{Eq. 8.11})$$

$$tg(\alpha) = \frac{(D_{eq} / 2)}{L_2} \quad (\text{Eq. 8.12})$$

$$r_i = tg(\alpha) \cdot L_2(y) \quad (\text{Eq. 8.13})$$

8.4. Model 3: Con

Si s'observen el conjunt d'imatges obtingudes a diferents pressions, es pot veure que el doll de foc a $P_{atm} = 1$ atm, s'allunya bastant dels models anteriorment plantejats. Si analitzem les dades de la Taula 21 que es troben en la secció 8.2.1, comprovem, que els models 1 i 2 no són idonis per a representar el seu comportament geomètric.

Posició respecte L	D [cm]
D0	0
D10	1,8056
D20	2,6228
D30	3,4949
D40	4,0362
D50	4,2773
D60	4,6310
D70	5,3878
D80	5,7642
D90	5,6787

Taula 30: Resum dades taula 21.

La taula de dades anteriors fa referència a la mitjana de D_i a les diferents posicions amb relació a l'inici de la flama en 20 imatges seleccionades a l'atzar. Si es representa gràficament es pot observar l'augment de D_i a mesura que ens desplacem cap amunt del eix y del doll de foc (veure Figura 21).

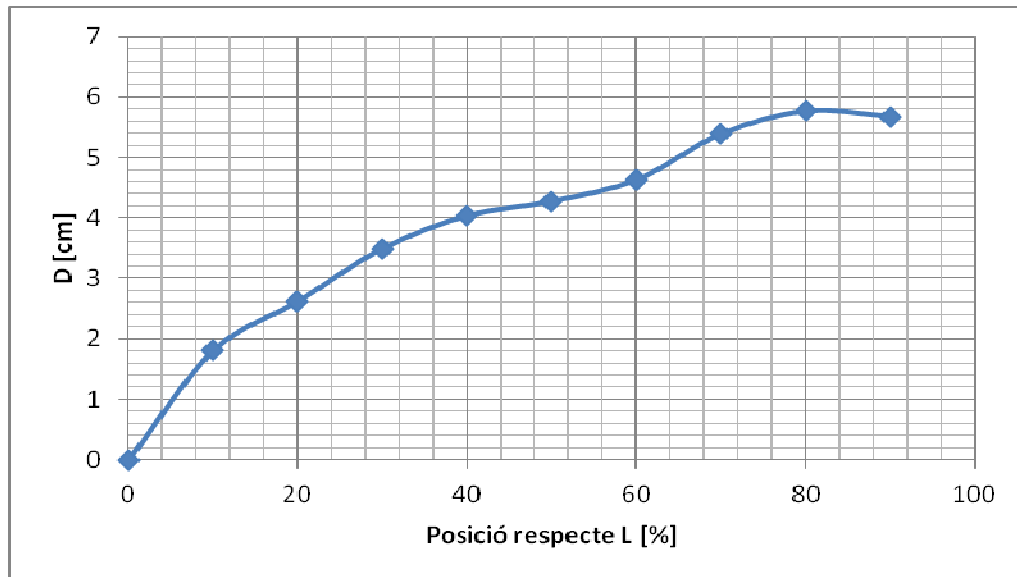


Figura 21: Variació de D_i -posició en funció de L.

Al considerar el doll de foc com un con invertit, si prenem com a referència el punt resultant de la intersecció de la generatriu de l'ejector i de la superfície superior d'aquest, especificarem la geometria del doll de foc a partir dels següents paràmetres:

- 1.- Diàmetre a l'extrem superior, [D].
- 2.- Longitud doll de foc, [L]= distància entre els dos punts extrems del doll.
- 3.- Radi del con, [r_i] = distància entre l'eix de simetria i l'extrem de la forma del doll de foc.
- 4.- Generatriu del con, [g].

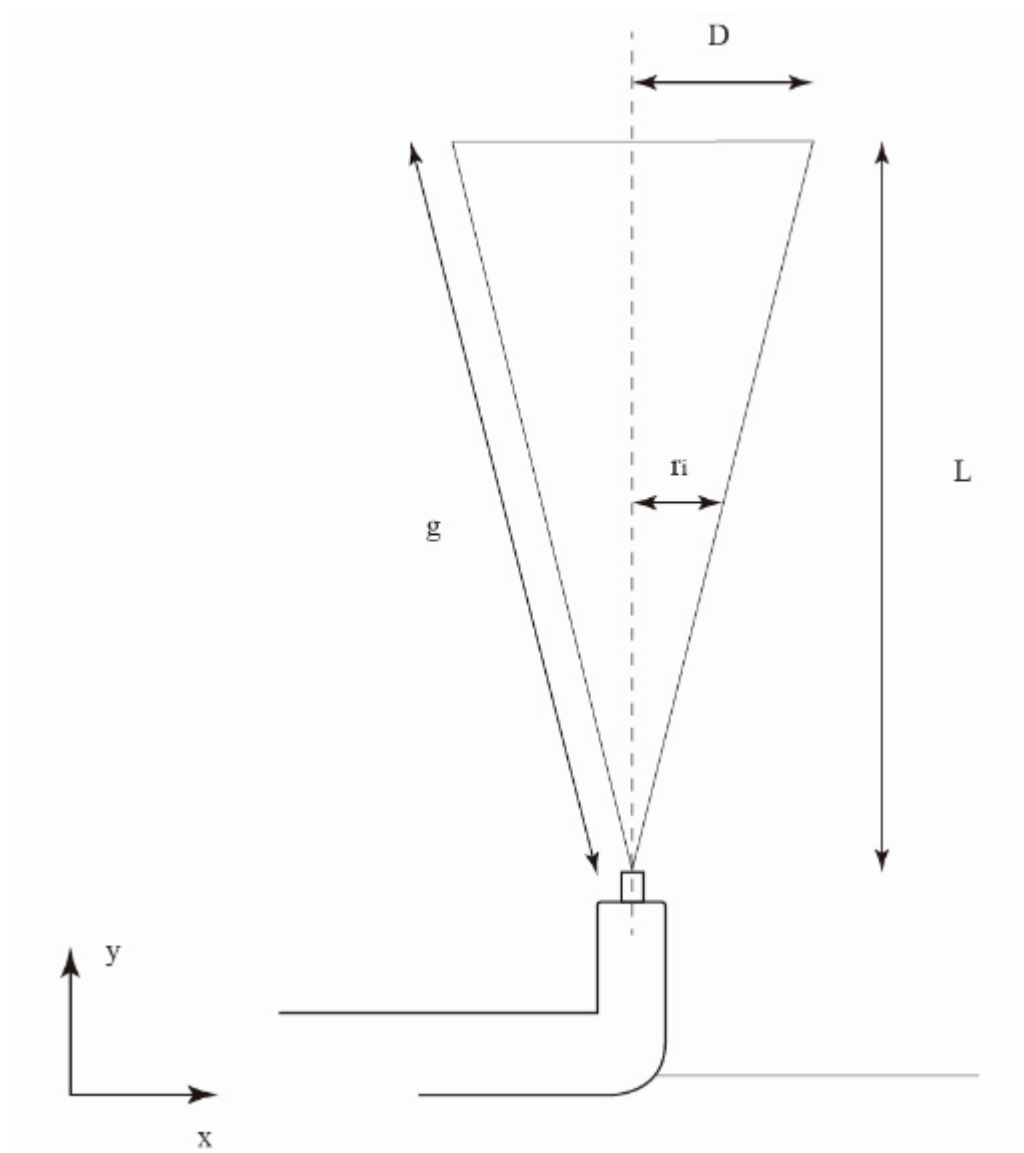


Figura 22: Esquema model 3.

8.4.1. Tractament de dades per a obtenir els paràmetres del model

Aquest model, es planteja com a una alternativa als models 1 i 2. Ara bé, el seu objectiu és completament diferent d'aquests, ja que els models 1 i 2 determinen els paràmetres a partir de P_{atm} i en el model 3 es donaran els paràmetres. Aquest model està enfocat a un escenari específic.

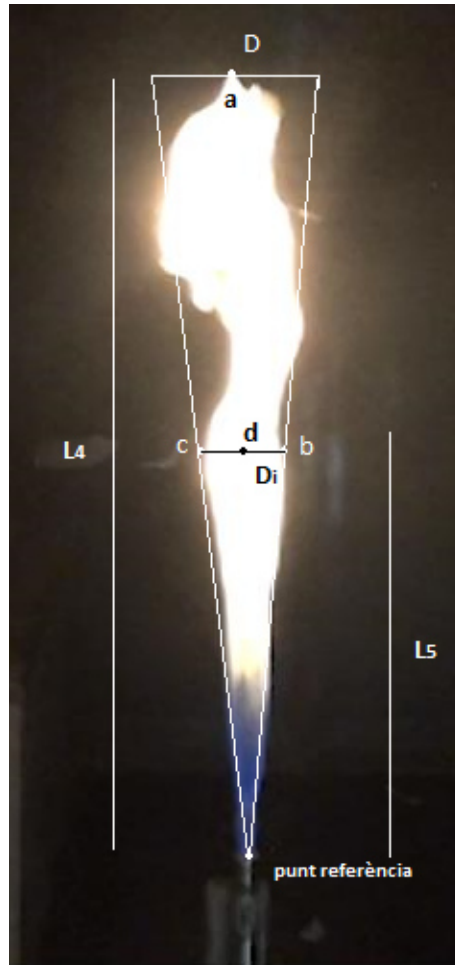


Figura 23: Exemple de tractament per a l'obtenció del model 3.

Procediment:

- 1.- Determinació del punt de referència (comú a totes les imatges).
- 2.- Obtenció del punt d, que és caracteritza per ser el punt que ens indica on el doll de foc deixa de mostrar un comportament de con invers. Aquest punt es pot presentar a diferents alçades respecte del punt de referència i ens servirà per projectar i obtenir D.
- 3.- A la mateixa alçada que el punt d determinem les coordenades dels punts c i b. Posteriorment es determinen les coordenades del punt a.
- 4.- Es calculen els valors dels paràmetres D_i , L_4 i L_5 . Mitjançant els paràmetres anteriors i les consideracions trigonomètriques pertinents obtenim D.

Amb els valors de D i L_4 , el model queda totalment definit.

nº imatge	punt ref.		punt d		punt b		punt c		punt a	
			dx	dy	bx	by	cx	cy	ax	ay
237	354	1073	353	830	381	830	321	829	341	656
238	354	1073	349	761	379	761	303	761	341	639
239	354	1073	360	804	385	804	335	804	341	666
240	354	1073	351	842	374	842	329	842	350	657
245	354	1073	361	697	387	695	324	696	332	621
249	354	1073	353	821	380	829	330	821	330	641
250	354	1073	356	774	393	778	321	778	341	653
257	354	1073	354	797	383	797	324	797	331	644
259	354	1073	355	886	376	886	335	886	341	626
262	354	1073	354	882	375	882	339	882	352	592
264	354	1073	356	848	383	848	337	848	352	671
269	354	1073	354	744	392	744	311	744	353	716
276	354	1073	355	753	391	753	325	753	355	609
277	354	1073	353	931	370	931	336	931	344	677
278	354	1073	353	763	388	763	323	763	355	631
280	354	1073	354	801	384	801	321	801	346	660
292	354	1073	356	758	390	758	317	758	344	658
293	354	1073	355	913	375	913	341	915	342	673
295	354	1073	352	685	379	680	322	680	337	624
298	354	1073	355	788	375	788	326	788	354	648

Taula 31: Tractament de les dades corresponents al model 3 (part 1).

nº imatge	L4 [cm]	L5 [cm]	Di [cm]	D [cm]
237	44,3063	25,8188	6,7265	11,5429
238	46,1125	33,1500	8,5202	11,8518
239	43,2438	28,5813	5,6054	8,4810
240	44,2000	24,5438	5,0448	9,0851
245	48,0250	39,9500	7,0628	8,4904
249	45,9000	26,7750	5,6054	9,6092
250	44,6250	31,7688	8,0717	11,3382
257	45,5813	29,3250	6,6143	10,2810
259	47,4938	19,8688	4,5964	10,9871
262	51,1063	20,2938	4,0359	10,1636
264	42,7125	23,9063	5,1570	9,2138
269	37,9313	34,9563	9,0807	9,8535
276	49,3000	34,0000	7,3991	10,7287
277	42,0750	15,0875	3,8117	10,6297
278	46,9625	32,9375	7,2870	10,3898
280	43,8813	28,9000	7,0628	10,7240
292	44,0938	33,4688	8,1839	10,7819
293	42,5000	17,0000	3,8117	9,5291
295	47,7063	41,2250	6,3901	7,3948
298	45,1563	30,2813	5,4933	8,1917
				9,9634

Taula 32: Tractament de les dades corresponents al model 3 (part 2).

8.4.2. Paràmetres del model 3

Aquest model només definirà l'escenari de $P_{atm} = 1$ atm. Els models 1 i 2 també es poden utilitzar per a aquesta pressió, però aquest model s'ha desenvolupat expressament per a un únic escenari perquè es considera que és més correcte.

Els paràmetres que defineixen el model són:

$L = 47,6500$ cm.

$D = 9,9634$ cm.

$S = 0$ cm.

8.5. Tendència dels models en funció de P_{atm}

Si s'observen les imatges preses a diferents pressions atmosfèriques, es veu que hi ha models que s'ajusten més que d'altres. Per a comprovar quin és el comportament geomètric a mesura que varia la pressió, es classifiquen les imatges corresponents a cada valor de P_{atm} , segons el model que donaria una millor aproximació.

P_{atm} [atm]	Model 1	Model 2	Model 3
0,64	410	345	0
0,8	341	413	1
0,9	317	435	3
1	57	100	598

Taula 33: Model segons el valor de la P_{atm} .

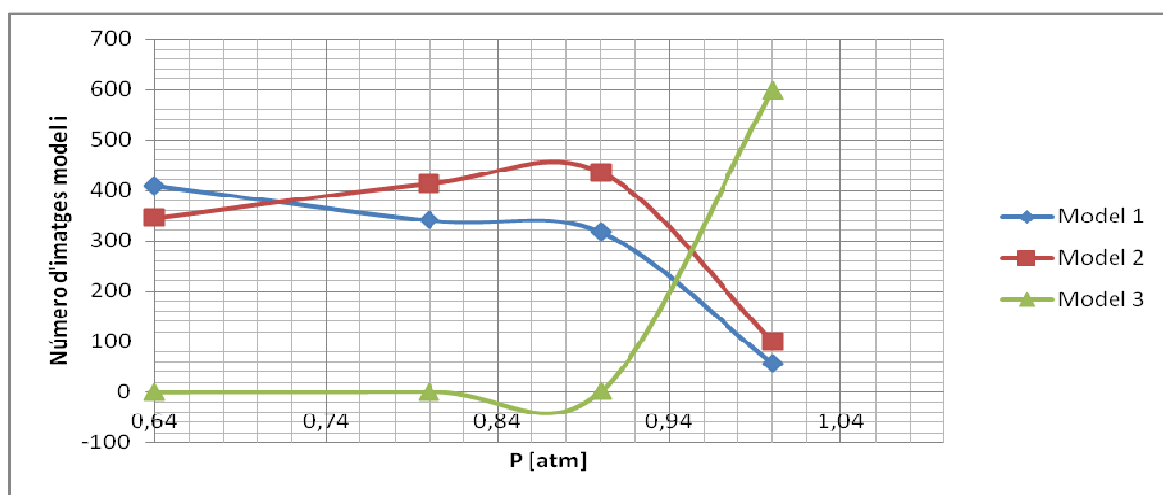


Figura 24: Millor model segons el valor de P_{atm} .

De la gràfica anterior podem extreure'n quin és el millor model segons el valor de la P_{atm} :

- Entre 0,64 i 0,71 atm es recomana utilitzar el model 1,
- Entre 0,71 i 0,95 atm es recomana utilitzar el model 2.
- Entre 0,95 i 1 atm es recomana utilitzar els paràmetres fixats pel model 3.

Cal destacar que en el rang de pressions 0,64-0,95 atm es podrien utilitzar únicament el model 1 o el 2. Si es vol estimar la geometria del doll de foc amb un únic model, es recomanaria utilitzar el model 1, ja que dona una geometria amb un volum major i per tant és més restrictiu.

A continuació es presenta un resum de les conclusions extretes en l'apartat 8. Per una banda es presenta l'algorisme que es suggereix seguir si es volen utilitzar els models plantejats. Per altra banda es mostra un resum de cada model, comprés de la figura geomètrica i de les corresponents equacions.

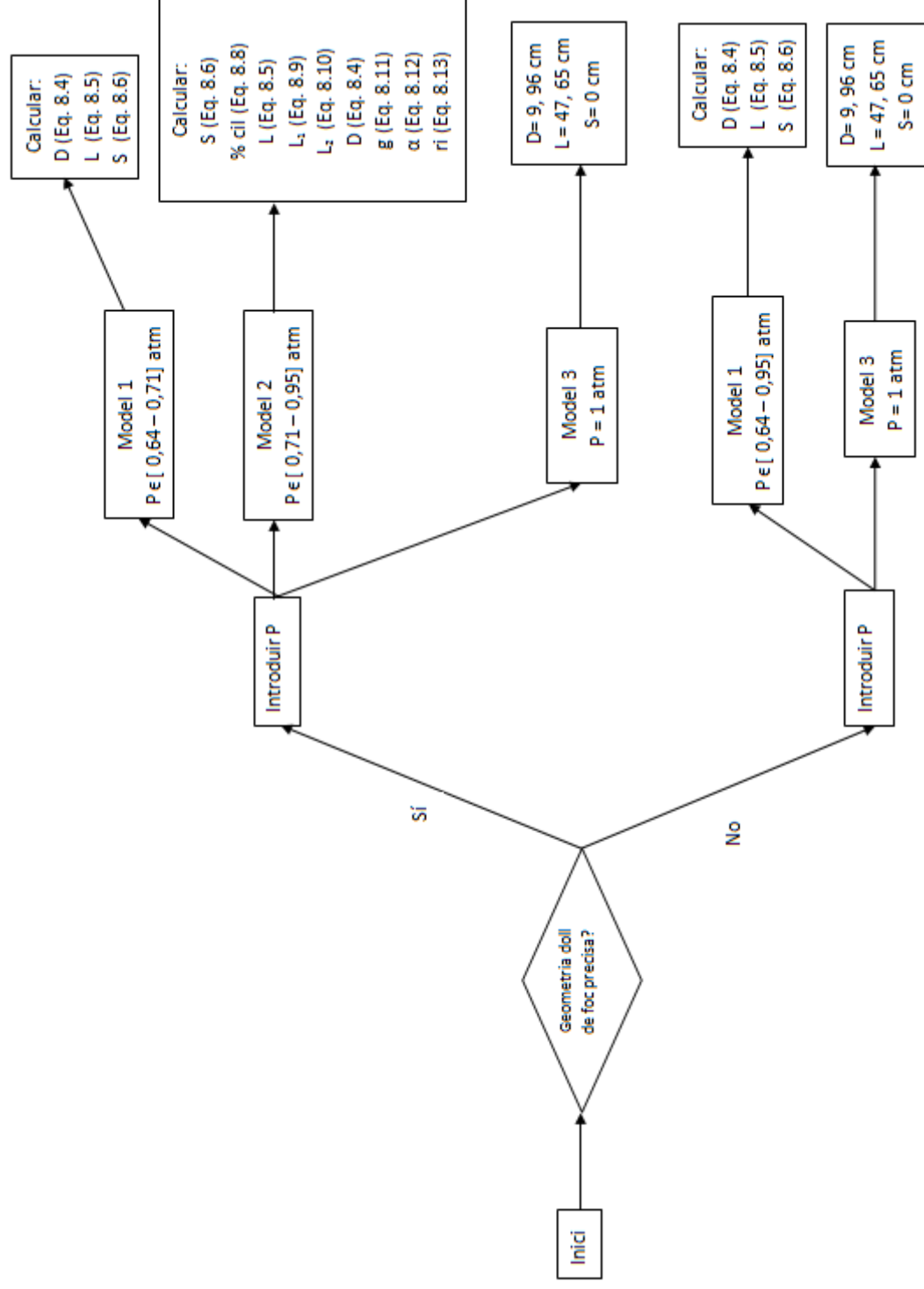
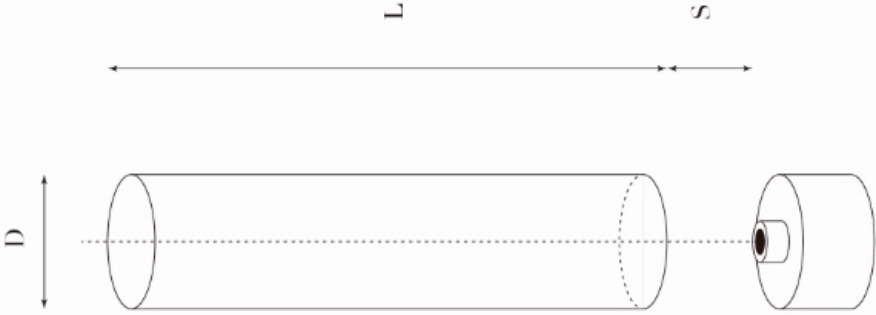
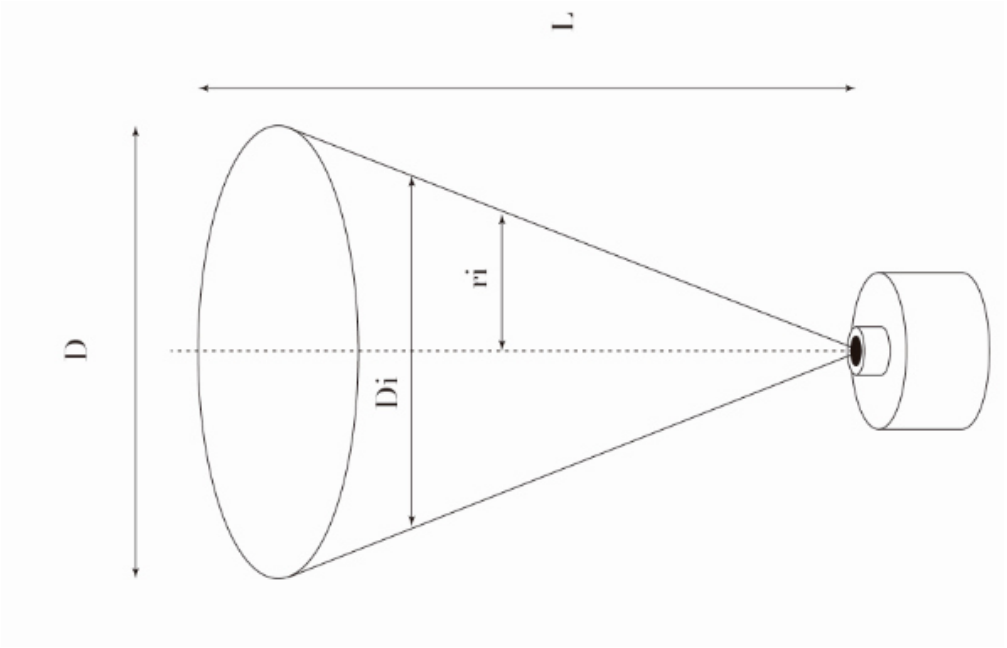


Figura 25: Algorisme de càlcul.

Model	Equacions	Representació
Model 1: Cilindre	<p>(Eq. 8.4) $D = -5,0908 \cdot P^2 + 6,2647 \cdot P + 3,0059$</p> <p>(Eq. 8.5) $L = 1,01 \cdot (40,429 \cdot P^2 - 45,599 \cdot P + 52,584)$</p> <p>(Eq. 8.6) $S = 1,02 \cdot (-12,667 \cdot P + 15,911)$</p>	

Model 3:Con	<div><p>$L= 47,6500\text{ cm}$</p><p>$D_i= 9,9634\text{ cm.}$</p><p>$S= 0\text{ cm.}$</p></div>	<div></div>
-------------	--	---

Taula 34: Resum models unidimensionals en funció de la P_{atm} .

9. Comparació amb models previs

Els models que es presenten a continuació són els corresponents als experiments més representatius sobre dolls de foc amb metà. Aquests models han estat obtinguts en condicions atmosfèriques (pròximes a 1 atm). Si volem comparar els models plantejats en la secció 8, segons l'algoritme suggerit, al estar a condicions atmosfèriques s'hauria de comparar el model 3 amb els altres models. Des del punt de vista teòric és més interessant comparar els tres models, de manera que s'han calculat els valors geomètrics i s'han comparat amb els models plantejats pels diferents autors.

Al voler estimar les dimensions del doll de foc segons diferents models, es convenient conèixer quin és el seu rang de validesa i la geometria plantejada. A la taula 35, es recullen les condicions en que es van dur a terme les experimentacions.

Model	Combustibles	Dor [mm]	Flux	Característiques de la flama	Geometria
Hawthorne et al. (1949)	<ul style="list-style-type: none"> · Acetilè · Monòxid de carboni · H₂ · Gas natural · Propè · Mescles de CO₂-gas natural i H₂ 	3 a 8	Subsònic	Flama vertical turbulent a petita escala fins a L=1m	Con invertit
API RP 521	<ul style="list-style-type: none"> · H₂ · Hidrocarburs 	0,51 a 40,6	Sònic	Flama vertical, model amb possibilitat d'influència del vent	No s'associa a cap geometria simple.
Gore et al (1986)	<ul style="list-style-type: none"> · Gas natural 	76 i 102	Sònic	Flames verticals fins a 25 m amb influència del vent	Únicament calcula L
Hustad and Sonju (1984)	<ul style="list-style-type: none"> · Metà · Propà 	10 a 80	Subsònic	Flames verticals fins a 8 m	Cilindre
Chamberlain (1987)	<ul style="list-style-type: none"> · Gas natural 	6 a 1070	Sònic i Subsònic	Flama de petita i gran escala sota l'influència del vent	Troc cònic

Taula 35: Models més significatius del doll de foc (metà/ gas natural).

Dels models de la taula 35 no se'n podrà fer la comparació amb l'API RP 521, ja que el model està plantejat per a calcular els paràmetres geomètrics a partir de la calor d'emissió, compresa entre 30 i 10000 MW, mentre que en els experiments estudiats $Q = 1595 \text{ W}$. Com que cau fora de rang i el doll modelitzat és sònic, el model no es considera adequat.

El model de Gore et al. (1986), també presenta unes condicions experimentals bastant diferents a les condicions estudiades. Els diàmetres de l'orifici que simulen la fuga són de 76 i 102 mm, metre que el de l'estudi és de 3 mm. També cal remarcar que es treballa en condicions sòniques. D'aquest model tampoc se'n farà la comparació.

Pels models plantejats a la secció 8, els paràmetres característics del doll de foc es resumeixen a la taula 36:

Paràmetres models a P=1 atm			
	M1	M2	M3
D/Dmax [cm]	4,18	4,18	9,96
L [cm]	48,02	48,02	47,65
S [cm]	3,31	3,31	0,00
H [cm]	51,32	51,32	47,65

Taula 36: Paràmetres doll de foc segons models plantejats.

A continuació es comparen els valors de la taula 36 amb els models de: Hawthorne (1949), Hustand i Sonju (1984), Chamberlain (1987) entre d'altres. S'ha comparat cada model de forma que en la primera columna es presenten els valors obtinguts del model i en les altres columnes s'observa la diferència percentual envers els models M1, M2 i M3, agafant com a referència els valors de M1, M2 i M3. En la comparació es discuteix de forma qualitativa, si els valors són superiors o inferiors i s'hi els valors predits es poden considerar semblants.

Hi ha paràmetres que no s'han comparat, ja que la diferència de geometries feien la comparació il·lògica.

9.1.1. Comparació amb el model de Hawthorne (1949)

	Hawthorne et al. (1949)	Dif M1[%]	Dif M2[%]	Dif M3[%]
D_{max} [cm]	12,01	-	-	17,04
L [cm]	63,70	24,62	24,62	25,20
S [cm]	3,77	12,25	12,25	-
H [cm]	67,47	31,4	31,4	41,59

Taula 37: Comparació amb el model de Hawthorne.

Podem observar que els paràmetres obtinguts per Hawthorne, són sempre superiors als valors predits per qualsevol dels tres models i que les diferències percentuals entre M1, M2 i M3 són semblants. Els valors predits pels models plantejats i els obtinguts pel model de Hawthorne diferencien significativament.

9.1.2. Comparació amb el model de Hustand i Sonju (1984)

	Hustad i Sonju (1984)	Dif M1[%]	Dif M2[%]	Dif M3[%]
d [cm]	5,42	22,88	22,88	-
H [cm]	45,60	-12,55	-12,55	-4,50

Taula 38: Comparació amb el model de Hustand i Sonju.

En el model de Hustand i Sonju, no es presenten els paràmetres L i S individualitzats. Aquest model dona directament el valor de H (suma de L i S).

Observant la diferència dels valors en forma percentual es pot veure com aquest model dóna valors majors en el diàmetre, metres que la distància d'abast del doll de foc que s'obté és inferior. El model M3 dóna un valor molt semblant de H al valor estimat pel de Hustand i Sonju, mentre que els altres paràmetres es diferencien significativament.

9.1.3. Comparació amb el model de Chamberlain (1987)

	Chamberlain (1949)	Dif M1/M2	Dif M3
L [cm]	48,86	1,73	2,48
S [cm]	9,77	195,16	-
W1 [cm]	0,299	-	-
W2 [cm]	12,68	-	27,30
H [cm]	58,63	14,24	23,04

Taula 39: Comparació amb el model de Chamberlain.

En el model de Chamberlain s'observa que tots els valors obtinguts són superiors als valors plantejats en els tres models. El valor de L en els tres models es molt semblant al valor obtingut en el model de Chamberlain, mentres que els altres paràmetres es diferencien significativament.

9.1.4. Comparació amb altres models

Aquesta secció està destinada a comparar els valors obtinguts amb els models que prediuen únicament un paràmetre. La comparació que és farà serà únicament dels paràmetres que independentment de la geometria, siguin realistes comparar-les (H, S).

Molts autors han considerat que el paràmetre més important en els dolls de foc és la distància d'abast H; degut a això, van desenvolupar models que únicament prediuen aquest paràmetre. El model està plantejat a partir d'una expressió exponencial del valor de Fr igual a la plantejada en (Eq 4.13). En la següent taula es mostren els paràmetres característics de cada model.

Autor	Rang Fr	a	n
Seeger i Werthenbach (1970)	Fins $3 \cdot 10^4$	29,00	0,20
Komov et al. (1973)	Fins $3 \cdot 10^4$	27,00	0,20
Hess (1964)	Fins $3 \cdot 10^4$	28,00	0,23
Sonju i Hustad (1984)	Fins $1 \cdot 10^5$	21,00	0,20
McCaffrey (1989)	Fins $3 \cdot 10^4$	28,00	0,20
Bagster i Schubach (1996)	Fins $1 \cdot 10^5$	23,00	0,20
Santos (2003)	Fins $1 \cdot 10^4$	26,00	0,20

Taula 40: Models per al valor de H de dolls de foc.

Autor	H [cm]	M1 /M2 [%]	M3 [%]
Seeger i Werthenbach (1970)	62,93	23,70	24,29
Komov et al. (1973)	58,59	18,05	18,68
Hess (1964)	81,76	41,27	41,72
Sonju i Hustad (1984)	45,57	-5,36	-4,56
McCaffrey (1989)	60,76	20,98	21,58
Bagster i Schubach (1996)	49,91	3,80	4,53
Santos (2003)	56,42	14,90	15,55

Taula 41: Comparació de H amb els models de la Taula 40.

Dels valors obtinguts veiem que els models de Sonju i Hustad (1984) i Bagster i Schubach (1996) s'aproximen als valors obtinguts pels tres models desenvolupats en el present treball. Per altra banda el model de Seeger Werthenbatch (1970) i Komov et al (1973) s'allunyen bastant dels paràmetres proposats en aquests tres models, donant valors superiors.

Un altre paràmetre que ha estat tractat de forma individual per diferents autors és la distància d'elevació (S) (o lift-off en la literatura anglosaxona). Aquests models prediuen el valor de S a partir de la velocitat del doll. En la següent taula es mostren els paràmetres característics dels models:

Autor	Dor [mm]	c[s]
Peter i Williams (1983)	4 a 12	0,0036
Sonju i Hustad (1986)	10 a 80	0,0036
Costa et al.(2004)	5 a 8	0,0031

Taula 42: Models per el càlcul de S en dolls de foc.

Autor	S[cm]	M1 /M2 [%]	M3 [%]
Peter i Williams (1983)	8,6920	61,94	-
Sonju i Hustad (1986)	8,6920	61,94	-
Costa et al.(2004)	7,4848	55,80	-

Taula 43: Comparació del valor de S amb els models de la Taula 42.

En aquest cas la comparació del paràmetre S no s'ha pogut fer respecte el model 3, ja que per aquest model el valor de $S = 0$ cm. Els dos primers models són experiments independents que van obtenir els mateixos paràmetres, per tant n'obtidrem els mateixos resultats. Els valors obtinguts són superiors als obtinguts pels models plantejats, diferenciant-se de forma significativa.

Els càlculs desenvolupats per obtenir els paràmetres dels diferents models es poden trobar en l'Annex 3.

10. Anàlisi de la geometria en funció de les variables

Les condicions en què es dona el doll de foc no solen ser constants, existeixen una certa fluctuació de les variables en funció del temps. Aquesta variació dels paràmetres en el temps fa variar la geometria, de forma que és interessant veure quin és l'efecte dels paràmetres d'una manera qualitativa (tendència), comprovant que augments o disminucions d'aquestes variables no impliquin condicions crítiques.

Per exemple, si suposem variacions d' u_j en forma de pics creixents, l'augment d'aquesta variable provoca un augment dels paràmetres S, L i D; per tant, s'ha de sobredimensionar. En cas contrari, en què hi haguessin pics decreixents, no implicaria problemes ja que els paràmetres S, L i D decreixerien. La idea és veure les possibles tendències per a prendre marges de seguretat sabent com afecten els canvis de valor a les condicions.

L'anàlisi qualitativa s'ha realitzat dels models plantejats per diferents autors, ja que les variables a partir de les quals es calculen els paràmetres geomètrics són diferents.

Variable	L	S	D
M	+	+	+
D_{or}	+	-	+
u_j	+	+	+
C_x (pes molecular hidrocarbur)	+	Independent	+
M	-	-	-
P_j	+	+	+
T_j	-	-	-
T_{cont}	-	-	-
P_{cont}	+	+	+
P_{atm}	+	-	-

Taula 44: Anàlisi qualitativa de les variables (tendència creixent).

La Taula 44 mostra l'efecte de l'augment de les variables inicials en la geometria del doll. L'efecte seria invers si es volgués observar la tendència decreixent de les variables inicials.

11. Avaluació econòmica

El projecte desenvolupat, no es pot entendre des del punt de vista econòmic com un actiu que proporcionarà un benefici en un cert horitzó, sinó com una eina per a minimitzar costos associats a possibles sinistres a l'empresa i per a reduir el risc per a les instal·lacions i les persones.

Els models plantejats són una eina pensada per a ser emprada en l'anàlisi de risc i, si són utilitzats amb criteri, poden evitar possibles sinistres en els complexos industrials (cal aquí recordar la importància que els dolls de foc tenen com a desencadenants del terrible "efecte dominó"). Per a valorar el perjudici econòmic de la empresa quan hi ha un sinistre, com es el cas, ens trobem en tres tipus de danys: personals, materials i mediambientals. L'empresa tindrà costos associats a la previsió dels sinistres que es poden produir en les seves instal·lacions com ara el disseny en la construcció, les mesures preventives, el manteniment, les assegurances de responsabilitat civil, les assegurances de danys, la responsabilitat d'administradors i el règim sancionador que sigui aplicable.

Els danys econòmics per a l'empresa (deixant de banda ara l'aspecte moral dels danys a persones) es tindran principalment en la part a la que no arribin les cobertures de les assegurances. Quan es dona un sinistre, seguint el llenguatge de les asseguradores, podem trobar dos tipus de danys: el dany emergent i el lucre cessant.

El dany emergent avaluarà per una part la reposició de les parts de les instal·lacions afectades, per a tornar-les a fer operatives.

El lucre cessant avaluarà els costos que té per a l'empresa no tenir operatives les instal·lacions afectades pel sinistre durant un temps indeterminat. Per exemple, podem veure que segons les instal·lacions afectades, en el pitjor del escenari podem tenir tota la planta parada. L'avaluació econòmica necessitarà d'un estudi individualitzat en cada cas.

12. Conclusions

Aquest projecte tenia com a principal objectiu determinar l'efecte de la pressió ambiental en la geometria dels dolls de foc. Del tractament de dades experimentals proporcionades per altres investigadors, s'han obtingut les següents conclusions:

- La pressió ambiental és una variable que en cap dels models plantejats prèviament no s'havia establert com un paràmetre determinant de la geometria. Nogensmenys, les dades analitzades mostren clarament que la pressió ambiental té un efecte significatiu en la geometria dels dolls.
- L'aproximació de la pressió atmosfèrica a una atmosfera dependent de la zona geogràfica on es treballa, pot representar un error significatiu (zones on la mitjana de la cota respecte el nivell del mar (msnm) és elevada).
- La variació de la pressió atmosfèrica afecta a la geometria, produint-se un augment de la longitud de flama [L], la disminució de la distància d'elevació [S] i la disminució de la secció de la flama [D] quan es produeix un augment de la pressió ambiental. La variació d'aquests paràmetres és important, ja que, el fet d'augmentar la pressió atmosfèrica augmenta el radi d'acció i la zona d'impacte del doll de foc ($L + S$).
- Els models desenvolupats amb anterioritat assumeixen diferents geometries, (con truncat en el model de Chamberlain, cilindre en el model de Husand i Sonju, etc). En el present estudi, s'ha observat que la geometria de la flama varia prou com per a assimilar la flama a diferents formes, en funció de la pressió atmosfèrica. S'ha observat que a pressions atmosfèriques en l'interval 0,64-0,71 atm, la forma recomanada és un cilindre; en l'interval 0,71- 0,95 atm es recomana la geometria composta per un cilindre de cos amb acabament en forma de con; i amb 0,95-1 atm es recomana un con invertit. Aquesta variació de geometria és important ja que varia el factor de visió i, per tant, la radiació tèrmica.
- En les comparacions realitzades amb altres models, s'observa que algunes aproximacions coincideixen de forma significativa, com es el cas de L en el model de Chamberlain o de S en el model de Hawthorne. Però s'ha de considerar que l'anàlisi de les mostres estava orientat a determinar de manera qualitativa l'efecte de la pressió atmosfèrica i no a determinar de manera quantitativa els paràmetres geomètrics de forma crítica, per a poder utilitzar el model en l'anàlisi de riscos.
- El model plantejat, es considera un pas endavant en la modelització de dolls de foc a pressions significativament diferents de 1 atm. Seria interessant, però, reunir un conjunt de dades experimentals més extens, obtenint informació de diferents escenaris (anàlisi de més variables). Les dades a obtenir haurien de tenir en

consideració la variació de diversos paràmetres, generant un model multivariable.

D'altres projectes i estudis que he consultat n'he extret idees que considero importants:

- La concepció que en general es té sobre el perill que pot causar el doll de foc com a esdeveniment aïllat, en comparació amb els altres tipus d'incendis, és clarament inferior. Segons estudis realitzats, la meitat dels dolls de foc acaben originant un afecte dominó. Per això és important conscienciar que el doll de foc és un risc important.
- Els escenaris més propensos a què es produeixi el doll del foc es donen en les fases de transport i emmagatzematge de GLP, hidrogen i gas natural.

Agraïments

En aquest apartat voldria donar les gràcies a les persones que m'han ajudat a poder dur a terme el projecte. Entre elles estan els professors Joaquim Casal i Adriana Palacios, els quals m'han ajudat en els aspectes tècnics i m'han guiat amb les seves recomanacions.

Per altra banda vull donar les gràcies a totes aquelles persones que m'han donat consell i m'han ajudat en diferents aspectes, els companys i els pares.

13. Bibliografia

13.1.Referències bibliogràfiques

- [1] Directiva 2012/18/UE del parlamento de la unió europea y el consejo , Saveso III 24/07/2012 pàg 6.
- [2] H. Perry, Robert., Perry's chemical engineers' handbook 1999, Capítol 26.
- [3] MODIFICACIONES DIRECTIVA SEVESO. (consultat el 01/03/2016).
[<http://ec.europa.eu/environment/seveso/>]
- [4] R.M. Darbra, J. Casal, *Historical analysis of accidents in seaports*, Saf. Sci. 42 (2004) .
- [5] M.F. Llop, El risc a l'indústria, Febrer de 2009. (consultat el 16/12/2015).
[http://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/1391/tecnologia_risc_industria.htm]
- [6] ACCIDENTS MAJORS REPRESENTATIUS. (consultat el 12/12/2015).
[<http://www.unizar.es>]
- [7] Casal. Joaquim, Evolution of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants, Industrial Safety Services vol 8, Elsevier, Amsterdam, 2008.
- [8] M. Gomez- Mares, M. Muñoz, A. Palacios, J. Casal, *Jet Fire:a 'Minor' Fire Hazard?* (2012).
- [9] M. Gómez-Mares, Luis-Zárate,J. Casal, *Jet Fires and domino effect* (2008).
- [10] Frank P. Lees, Loss Prevention in the Process Industries, Reed educational and Professional Publishing Ltd 1996.
- [11] American Petroleum institute , For pressure relieving an depressing systems API Recomendad Practise ,1997.
- [12] CALCULADORA PRESSIÓ ATMOSFÈRICA (consultat el 20/03/2016).
[<http://www.digitaldutch.com/atmoscalc/>]
- [13] Country Geography Data, Portland State University (consultat el 20/03/2016).

- [14] A. Palacios, J.Casal., *Assessment of the shape of vertical jet fires*, Fuel 90, Elsevier (2008).

13.2. Material bibliogràfic complementari

- T.A. BRZUSTOWSKI, New criterion for the length of a turbulent diffusion flame, - 1073.
- G.T. Kalghatki, Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air, 1984.
- INERIS, Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs FEU TORCHE, 10/03/2014.

Annex 1: Valors dels escenaris experimentals

i	P _{atm} (atm)	T _{atm} (°C)	D _{or} (mm)	Q' (L/mi)	Q' (m ³ /s)	ρ _{ambient} (kg/m ³)	μ _{ambient} (kg/m s)	Area (m ²)	u _j (m/s)	Type flow	m (kg/s)	Re	Fr
CH ₄	0,64	24	3	10,24	1,71E-04	0,395309191	1,123E-05	7,07E-06	24,14	subsonic	6,75E-05	2548,89	1,98E+04
CH ₄	0,8	24,9	3	10,24	1,71E-04	0,525715309	1,127E-05	7,07E-06	24,14	subsonic	8,97E-05	3379,62	1,98E+04
CH ₄	0,9	25,2	3	10,24	1,71E-04	0,590963176	1,128E-05	7,07E-06	24,14	subsonic	1,01E-04	3795,12	1,98E+04
CH ₄	1	25,2	3	10,24	1,71E-04	0,656772062	1,128E-05	7,07E-06	24,14	subsonic	1,12E-04	4217,09	1,98E+04

Annex 2: Mostra del valor de la Patm en polígons de Catalunya

Polígon industrial	Municipi	Província	H (msnm)	Patm (atm)
Agripa	Castellbisbal	Barcelona	132	0,984
Aigueta	Cabanes	Girona	26	0,996
Ampliación la Verdaguera	Móra d'Ebre	Tarragona	38	0,995
Ampliación polígono Raconada	Torrefarrera	Lleida	214	0,974
Baix Ebre	Tortosa	Tarragona	14	0,998
Camí dels Frares	Lleida	Lleida	155	0,981
Camí Ral	Gavà	Barcelona	9	0,998
Can Borés	Anglès	Girona	181	0,978
Can Portella	Argelaguer	Girona	183	0,978
Can Puigtió	Maçanet de la Selva	Girona	100	0,988
Can Roura	Maçanet de la Selva	Girona	100	0,988
Closa de'n Ilop	Escala	Girona	14	0,998
Cassà Oest	Cassà de la Selva	Girona	137	0,983
Celdrà	Celrà	Girona	71	0,991
Cim la Selva	Vilobí d'Onyar	Girona	148	0,982
Coll del rei	Corbins	Lleida	211	0,975
Creu de la Beguda	Vila-seca	Tarragona	42	0,995
El barranc d'en Lledó	Santa Bàrbara	Tarragona	79	0,99
El Molé de la Barnola I	Avinyó	Barcelona	353	0,958
El Plà	Castelló d'Empúries	Girona	17	0,997
El Segre	Lleida	Lleida	155	0,981



El Soler	Avinyó	Barcelona	353	0,958
El Trust-I	Cassà de la Selva	Girona	137	0,983
El Verdguer	Manlleu	Barcelona	461	0,946
Els Cossos	Fortià	Girona	8	0,999
La Nora	Alcoletge	Lleida	213	0,975
Gaberneres	Alcoletge	Lleida	213	0,975
Gran indústria	Vila-seca	Tarragona	42	0,994
Homs	Alcarràs	Lleida	137	0,983
Albornar	Santa Oliva	Tarragona	101	0,988
Era del Comte	Almacelles	Lleida	247	0,971
La Borda	Caldes de Montbui	Barcelona	203	0,976
La Canaleta	Tàrraga	Lleida	373	0,956
La Coromina	Balsareny	Barcelona	327	0,962
Carrer França	Olot	Girona	443	0,948
La Maiola	Avinyó	Barcelona	353	0,958
La Plana	Gandesa	Tarragona	368	0,957
La Rabosa	Alcarràs	Lleida	137	0,983
La Vallan	Berga	Barcelona	704	0,919
Les Adoberies Oest	Calldetenes	Barcelona	489	0,943
El Fontando	Bellpuig	Lleida	308	0,964
Les Malloles	Balsareny	Barcelona	327	0,961
Les Tosses	Amposta	Tarragona	8	0,999
Lleida Park	Lleida	Lleida	155	0,981
Martí Casals	Alfarràs	Lleida	281	0,976
Mas Aliu	Aiguaviva	Girona	169	0,98
Moià	Moià	Barcelona	714	0,918
Navàs	Navàs	Barcelona	370	0,956

Paracuellos	Alcarràs	Lleida	137	0,983
Can Simón	Santa Coloma de Farners	Girona	142	0,983
Pla de les Vinyes	Almacellas	Lleida	247	0,971
Pla del Dolé	Albatàrec	Lleida	142	0,983
Pont Cremat	Arbúcies	Girona	287	0,966
Prat del Molinet	Arbúcies	Girona	287	0,966
Puigdorca	Balsereny	Barcelona	327	0,961
Revés nord	Alcarràs	Lleida	137	0,983
La tallada	Sant Guim de Freixanet	Lleida	738	0,915
S-18 oest	Begur	Girona	200	0,976
Salelles I	Sant Salvador de Guardiola	Barcelona	374	0,956
Salelles II	Sant Salvador de Guardiola	Barcelona	374	0,956
Santa Rita	Castellbisbal	Barcelona	132	0,948
Sau 11 Industrial	Artesa de Lleida	Lleida	202	0,976
Sector únic	Alcarràs	Lleida	137	0,983
Sota el Molí	Montmeló	Barcelona	72	0,991
La colomina II	Tremp	Lleida	468	0,945
Torrefarrera	Torrefarrera	Lleida	214	0,974
Torres Pujals	Arbúcies	Girona	287	0,966
Zona industrial PP5	Almenar	Lleida	329	0,961
22 @ Barcelona	Barcelona	Barcelona	13	0,998
2A La fàbrica	Castellgalí	Barcelona	266	0,968
Abadal	Súria	Barcelona	326	0,961
Actuación la Gelidense	Gelida	Barcelona	199	0,976
Alpicat lúdic parc	Alpicat	Lleida	260	0,969
Ambit modeificació puntual	Cervera	Lleida	548	0,936
Zona industrial els arcs-sector	Sant Jaume de Domenys	Tarragona	213	0,975

Parque de actividades económicas de				
osona	Vic	Barcelona	484	0,943
Polígon Olius	Olius	Lleida	565	0,934
Ampliació riu clar	Tarragona	Tarragona	68	0,991
Sort del Capellans	Falset	Tarragona	364	0,957
Àrea llevant	Tàrraga	Lleida	373	0,956
Campllong	Balaguer	Lleida	233	0,972
Castellots	Borges Blanques	Lleida	295	0,965
Els Recs	Escala	Girona	14	0,998
El pla de codina	Bellver de Cerdanya	Lleida	1061	0,88
Els Salacons	Sort	Lleida	692	0,92
La Cabana	Navès	Lleida	900	0,897
Les Garrigues	Calaf	Barcelona	680	0,921
La morana	Torrefeta i Florejacs	Lleida	475	0,944
La Noguea	Térmens	Lleida	208	0,975
Casa Nova	Aiguaviva	Girona	169	0,98
La seu industrial	Seu d'Urgell	Lleida	692	0,92
Pic-2 Fase	Constantí	Tarragona	87	0,989
Les Pedreres	Arbeca	Lleida	332	0,961
Montferrer i castellbò	Montferrer i Castellbò	Lleida	732	0,916
El pla	Lliçà de vall	Barcelona	125	0,985
Pla Parcial	Gomés	Lleida	275	0,967
Riera Tordera	Maçanet de la Selva	Girona	100	0,988
STA. Maria d'Artés	Artés	Barcelona	316	0,963
Nuevo sector industrial	Vinaixa	Lleida	479	0,944
La Cort	Cardona	Barcelona	507	0,941

Annex 3: Càlculs desenvolupats

CÀLCULS MODEL 1

$$D = -5,0908 \cdot P^2 + 6,2647 \cdot P + 3,0059 = -5,0908 \cdot 1^2 + 6,2647 \cdot 1 + 3,0059 = 4,18 \text{ cm}$$

$$L = 1,01 \cdot (40,429 \cdot P^2 - 45,599 \cdot P + 52,584) = 1,01 \cdot (40,429 \cdot 1^2 - 45,599 \cdot 1 + 52,584) = 48,02 \text{ cm}$$

$$S = 1,02(-12,667 \cdot P + 15,911) = 1,02(-12,667 \cdot 1 + 15,911) = 3,31 \text{ cm}$$

$$H = S + L = 3,31 + 48,02 = 51,33 \text{ cm}$$

CÀLCULS MODEL 2

$$S = 1,02(-12,667 \cdot P + 15,911) = 1,02(-12,667 \cdot 1 + 15,911) = 3,31 \text{ cm}$$

$$\%cil = (118,76 \cdot P^2 - 164,04 \cdot P + 128,32) \frac{1}{100} = (118,76 \cdot P^2 - 164,04 \cdot P + 128,32) \frac{1}{100} = 0,83$$

$$L = 1,01 \cdot (40,429 \cdot P^2 - 45,599 \cdot P + 52,584) = 1,01 \cdot (40,429 \cdot 1^2 - 45,599 \cdot 1 + 52,584) = 48,02 \text{ cm}$$

$$L_1 = \%cil \cdot L = 0,83 \cdot 48,02 = 39,87 \text{ cm}$$

$$L_2 = (1 - \%cil) \cdot L = (1 - 0,83) \cdot 48,02 = 8,15 \text{ cm}$$

$$Di = -5,0908 \cdot P^2 + 6,2647 \cdot P + 3,0059 = -5,0908 \cdot 1^2 + 6,2647 \cdot 1 + 3,0059 = 4,18 \text{ cm}$$

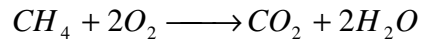
$$g = \sqrt{\left(\frac{Di}{2}\right)^2 + (L_2)^2} = \sqrt{\left(\frac{4,18}{2}\right)^2 + (8,14)^2} = 8,40 \text{ cm}$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{(Di/2)}{L_2}\right) = \arctg\left(\frac{(4,18/2)}{8,15}\right) = 14,39^\circ$$

$$H = S + L = 3,31 + 48,02 = 51,33 \text{ cm}$$

CALCULS MODEL DE HAWTHORNE(SIMPLIFICAT)

Variables inicials	
Ma [g/mol]	29
Mv [g/mol]	16
Dor [m]	$3 \cdot 10^{-3}$



$$c_{st-vol} = \frac{1}{1 + 2 \frac{1}{0,21}} = 0,095$$

$$L = D_{or} \frac{15}{c_{st-vol}} \left(\frac{M_a}{M_v} \right)^{\frac{1}{2}} = 3 \cdot 10^{-3} \frac{15}{0,095} \left(\frac{29}{16} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,637m$$

$$S = \frac{6,4 \cdot \pi \cdot D \cdot u_j}{4u_{av}} = \frac{6,4 \cdot \pi \cdot D \cdot u_j}{4 \cdot 0,4u_j} = \frac{6,4 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 0,4} = 0,0377m$$

$$W = \frac{L}{5,3} = \frac{0,637}{5,3} = 0,1201m$$

$$H = S + L = 0,0377 + 0,637 = 0,6747m$$

CALCULS MODEL DE HUSTAND AND SONJU

Variables inicials	
Dor [m]	$3 \cdot 10^{-3}$
Q' [m³/s]	$1,71 \cdot 10^{-4}$

$$u_j = \frac{m}{\pi \frac{(Dor)^2}{4}} = \frac{1,71 \cdot 10^{-4}}{\pi \frac{(3 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 24,14m/s$$

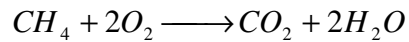
$$Fr = \frac{u_j^2}{g \cdot D_{or}} = \frac{(24,14)^2}{9,81 \cdot (3 \cdot 10^{-3})} = 1,98 \cdot 10^4$$

$$H = D_{or} \cdot 21 \cdot Fr^{0,2} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 21 \cdot (1,98 \cdot 10^4)^{0,2} = 0,456m$$

$$d = D_{or} \cdot 2,5 \cdot Fr^{0,2} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot (1,98 \cdot 10^4)^{0,2} = 0,0542m$$

CALCULS MODEL DE CHAMBERLAIN

Variables inicials	
Ma [g/mol]	29
Mv [g/mol]	16,043
uj [m/s]	24,14
paire [Kg/m³]	1,225
ρj [Kg/m³]	0,6567
g [m/s²]	9,81



$$c = \frac{1 \cdot 16,043}{1 \cdot 16,043 + 2 \cdot \frac{1}{0,21} \cdot 29} = 0,05489$$

$$ds = D_{or} \cdot \left(\frac{\rho_j}{\rho_{aire}} \right)^{\frac{1}{2}} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,6567}{1,225} \right)^{\frac{1}{2}} = 2,19 \cdot 10^{-3} m$$

$$0,024 \cdot \left(\frac{g \cdot d_s}{u_j^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Y^{\frac{5}{3}} + 0,2 \cdot Y^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{2,85}{c} \right)^{\frac{2}{3}} = 0$$

$$0,024 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 2,19 \cdot 10^{-3}}{24,14^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Y^{\frac{5}{3}} + 0,2 \cdot Y^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{2,85}{0,05489} \right)^{\frac{2}{3}} = 0 \rightarrow Y = 223,15$$

$$L_{b0} = Y \cdot ds = 223,15 \cdot 2,19 \cdot 10^{-3} = 0,4886 m$$

$$L_b = L_{b0} \rightarrow L_{b0} = 0,4886 m \quad (\text{escenari sense influència del vent } u_w = 0 \text{ m/s})$$

$$S = 0,2 \cdot L_{b0} = 0,2 \cdot 0,4886 = 0,09772 m$$

$$Rw = \frac{u_w}{u_j} = 0 \quad (\text{escenari sense influència del vent } u_w = 0 \text{ m/s})$$

$$W_1 = d_s \cdot (13,5 \cdot e^{-6 \cdot R_w} + 1,5) \cdot \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\rho_{aire}}{\rho_j} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{15} \right] e^{-70 R_{ids} C' R_w} \right] =$$

$$2,19 \cdot 10^{-3} \cdot (13,5 \cdot e^{-6 \cdot 0} + 1,5) \cdot \left[1 - \left[1 - \left(\frac{1,225}{0,6567} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{15} \right] e^0 \right] = 2,99 \cdot 10^{-3} m$$

$$W_2 = L_b (0,18 e^{-1,5 R_w} + 0,31) (1 - 0,47 e^{-25 R_w}) = 0,4886 (0,18 e^{-1,5 \cdot 0} + 0,31) (1 - 0,47 e^{-25 \cdot 0})$$

$$W_2 = 0,1268 m$$

$$H = S + L = 0,0977 + 0,4886 = 0,5863 m$$

CALCULS ALTRES MODELS

Autor	a[-]	n[-]	H [m]
Seeger i Werthenbach (1970)	29,00	0,20	0,6293
Komov et al. (1973)	27,00	0,20	0,5859
Hess (1964)	28,00	0,23	0,8176
Sonju i Hustad (1984)	21,00	0,20	0,4557
McCaffrey (1989)	28,00	0,20	0,6076
Bagster i Schubach (1996)	23,00	0,20	0,4991
Santos (2003)	26,00	0,20	0,5642

$$H = D_{or} \cdot a \cdot Fr^n = D_{or} \cdot a \cdot Fr^n = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 291,98 \cdot 10^{4 \cdot 0,2} = 0,629 m$$

L'expressió s'ha aplicat per el cas de Seeger i Werthenbach (1970), pels altres autors el procés de càlcul és el mateix.

Autor	Dor [mm]	c[s]	S[cm]
Peter i Williams (1983)	4 a 12	0,0036	8,6920
Sonju i Hustad (1986)	10 a 80	0,0036	8,6920
Costa et al.(2004)	5 a 8	0,0031	7,4848

$$\frac{S}{d} = c \cdot \frac{u_j}{d} = 0,0036 \cdot 24,14 = 0,0869m$$

L'expressió s'ha aplicat per el cas de Peter i Williams (1983), pels altres autors el procés de càlcul és el mateix.

Annex 4: Planificació del treball amb GanttProject

Estudi del comportament i modelització dels dolls de foc

27-abr-2016
2

Tarea

Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin
ESTUDI DEL COMPORTAMENT I MODELITZACIÓ DELS DOLLS DE FOC		
FASE 1: Documentació prèvia	1/10/15	30/04/16
Recopilació d'informació bàsica	1/10/15	15/11/15
Recopilació d'informació específica dels incendis	1/10/15	31/10/15
FASE 2: Desenvolupament models	1/11/15	15/11/15
Desenvolupar procés de dimensionament imatges instal·lació	16/11/15	14/01/16
Dimensionament imatges Patm=0,64 atm	16/11/15	16/11/15
Dimensionament imatges Patm=0,8 atm	17/11/15	6/12/15
Dimensionament imatges Patm=0,9 atm	17/11/15	6/12/15
Dimensionament imatges Patm=1 atm	7/12/15	26/12/15
Tractament de dades per obtenir model 1	7/12/15	26/12/15
Ampliació de dades/ tractament de dades per a ajustar paràmetres S, L model 1	27/12/15	28/12/15
Tractament de dades per obtenir model 2	29/12/15	7/01/16
Tractament de dades per obtenir model 3	8/01/16	9/01/16
Tractament de dades variació geometria en funció de la Patm.	10/01/16	11/01/16
FASE 3: Documentació instal·lació presa de dades	12/01/16	14/01/16
Recopilació informació instal·lació experimental	15/01/16	18/01/16
Realització del P&ID i descripció de la instal·lació	15/01/16	15/01/16
FASE 4: Demostració variació Patm	16/01/16	18/01/16
Recopilació de dades	16/01/16	28/01/16
Obtenció de la Patm amb l'eina digitaldutch	16/01/16	25/01/16
FASE 5: Recerca models previs	26/01/16	28/01/16
Recopilació informació models	29/01/16	17/02/16
FASE 6: Comparació models planatjats amb els models de la FASE 5	29/01/16	17/02/16
Desenvolupament càlculs models plantajats	18/02/16	3/03/16
Desenvolupament càlculs models previs	18/02/16	18/02/16
Comparació valors	18/02/16	27/02/16
FASE 7: Realització d'estudis complementaris al treball realitzat	28/02/16	3/03/16
Anàlisi geometria en funció de les variables	4/03/16	8/03/16
	4/03/16	8/03/16

Estudi del comportament i modelització dels dolls de foc

27-abr-2016

Tarea

3

Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin
Avaluació econòmica	4/03/16	8/03/16
Conclusions	4/03/16	6/03/16
FASE 8: Redacció memoria	7/03/16	30/04/16
Redacció projecte	7/03/16	30/04/16

Estudi del comportament i modelització dels dolls de foc

Diagrama de Gantt

